

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

Estudo dos parâmetros físicos na fluidização em um leito gás sólido

Isabella Aparecida Marzola

Prof. Dr. Francisco José dos Santos (orientador)

Rio Claro (SP)

2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

ISABELLA APARECIDA MARZOLA

ESTUDO DOS PARÂMETROS FÍSICOS NA FLUIDIZAÇÃO
EM UM LEITO GÁS SÓLIDO

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas - Campus de
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau
Licenciado em Física

Rio Claro - SP

2012

ISABELLA APARECIDA MARZOLA

ESTUDO DOS PARÂMETROS FÍSICOS NA FLUIDIZAÇÃO EM UM LEITO GÁS SÓLIDO

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Físico.

Comissão Examinadora

Francisco José dos Santos (orientador)

Edson José Vasques

Roberto Eugenio Lagos Monaco

Rio Claro, 22 de Novembro de 2012.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

530 M393e	Marzola, Isabella Aparecida Estudo dos parâmetros físicos na fluidização em um leito gás sólido / Isabella Aparecida Marzola. - Rio Claro : [s.n.], 2012 71 f. : il., figs., gráfs., forms., tabs., fots. Trabalho de conclusão de curso (licenciatura e bacharelado - Física) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas Orientador: Francisco José dos Santos 1. Física. 2. Fluidodinâmica. 3. Distribuição de massa em leito fluidizado. 4. Fluidização gás-sólido. 5. Mecânica dos fluídos. I. Título.
----------------------	--

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

RESUMO

Através de medidas de parâmetros básicos para a determinação do regime de fluidização, como granulometria, velocidade mínima de fluidização, porosidade do leito, etc., este trabalho visa analisar a distribuição de massa das fases do leito para serem discutidos em relação à: vazão do gás, propriedades físicas das partículas sólidas e as forças que agem sobre as partículas sólidas que circulam dentro do leito; como a força peso, o empuxo e a força de arrasto (Lei de Stokes). Devido à força peso ser constante, abre-se a discussão sobre qual das outras duas forças, o empuxo e a força de arrasto, influenciam no comportamento do leito. Para tal, utilizou-se o método fotográfico que permitiu a realização das análises estatísticas. Com isso, podemos concluir quais as alterações mais convenientes podem ser feitas na fluidização do leito para que se obtenha a maior eficiência de uma boa mistura durante sua utilização nos processos industriais.

Palavras-chave: Fluidização. Leito Gás - Sólido. Parâmetros Físicos.

ABSTRACT

Through measurements of basic parameters for determining the fluidization regime, as particle size, minimum fluidization velocity, bed porosity, etc., This paper analyze the mass distribution of the phases of the bed to be discussed in relation to: the flow gas physical properties of the solid particles and the forces acting on the solid particles circulating within the bed, as the weight force, buoyancy and drag forces (Stokes' Law). Due to the weight force is constant, open up the discussion about which of the other two forces, buoyancy and drag force, influencing the behavior of the bed. We used the photographic method to realize the statistical analyzes. Therefore, we can conclude what changes can be made more convenient in fluidizing the bed to obtain the highest efficiency for a good mixing used in industrial processes.

Keywords: Fluidization. Bed Gas - Solid. Physical Parameters.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 Fluidodinâmica do leito fluidizado (Adaptado de SANTOS, 2010)	6
2.2 Grandezas básicas (Adaptado de SANTOS, 2010)	11
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL I.....	18
3.1 Montagem Experimental I.....	18
3.2 Método I: Determinação das grandezas básicas.....	20
3.3 Análise I: Comparação dos materiais: esferas de vidro, areia e alumina	21
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL II.....	25
4.1 Montagem Experimental II.....	25
4.2 Método II: O Método fotográfico	29
4.3 Análise II: Amostras fora da emulsão (%) VS. Diâmetro das amostras	33
4.4 Análise III: II: Amostras fora da emulsão (%) VS. Densidade das amostras	53
4.5 Análise IV: Amostras fora da emulsão (%) VS. Vazão de ar no leito	60
5. FORÇAS QUE ATUAM SOBRE AS BIOMASSAS IMERSAS NO LEITO	68
5.1 Força Peso	68
5.2 Força de arraste	68
5.3 Força de empuxo	69
6. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da fluidização caracteriza-se pelo contato entre partículas sólidas e uma corrente ascendente de gás, e proporciona altas taxas de transferências de calor e massa, sendo utilizado em processos industriais físicos (secagem e recobrimento de partículas) e químicos (catálise e fermentação) e termoquímicos como pirólise, gaseificação e combustão. (SANTOS, 2010, p. 269)

Através de medidas de parâmetros básicos para a determinação do regime de fluidização, como granulometria, velocidade mínima de fluidização, porosidade do leito, etc., este trabalho visa analisar a distribuição de massa das fases do leito para serem discutidos em relação à: vazão do gás, propriedades físicas das partículas sólidas e as forças que agem sobre as partículas sólidas que circulam dentro do leito; como a força peso, o empuxo e a força de arrasto (Lei de Stokes). Devido à força peso ser constante, abre-se a discussão sobre qual das outras duas forças, o empuxo e a força de arrasto, influenciam no comportamento do leito. Para tal, foi utilizado o método fotográfico que permitiu a realização das análises estatísticas.

Com isso, podemos concluir quais as alterações mais convenientes podem ser feitas na fluidização do leito para que se obtenha a maior eficiência de uma boa mistura durante sua utilização nos processos industriais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão introduzidos os fundamentos sobre a fluidodinâmica de um leito fluidizado gás-sólido. O fenômeno da fluidização caracteriza-se pelo contato entre partículas sólidas e uma corrente ascendente de gás, proporcionando altas taxas de transferência de calor e massa, sendo amplamente utilizado em processos industriais físicos (secagem, e recobrimento de partículas) e químicos (reações catalíticas e fermentação) e termoquímicos como pirólise, gaseificação e combustão.

2.1 Fluidodinâmica do leito fluidizado (adaptado de SANTOS, 2010, p. 269).

A alta utilização e aceitação dos reatores aplicados na indústria que utilizam os princípios de um leito fluidizado, tais como: mistura, granulação, secagem, cobertura, aquecimento e resfriamento é resultado da excelência de seu funcionamento devido à alta eficiência de conversão; para uma variada gama de insumos energéticos, altas taxas de transferência de calor entre os inertes do leito e superfícies imersas e a facilidade de controle do processo para evitar e diminuir a emissão de poluentes. Além disso, a preparação da biomassa é mais simples que a requerida por outros sistemas.

A tecnologia empregada nos reatores de leito fluidizado permite uma excelente conversão termoquímica (pirólise, gaseificação ou combustão) de biomassa, sendo uma fonte de energia renovável e neutra em relação à geração de gases do efeito estufa.

Ao alimentar o reator de leito fluidizado borbulhante (RLFB) com a biomassa, ocorrem processos físicos e químicos. Para o projeto do reator LFB, é requerido o conhecimento dos fatores que controlam esses processos, principalmente para que haja o aproveitamento pleno de seu potencial, através de relações entre a fluidodinâmica do leito fluidizado e a boa mistura ou distribuição da biomassa dentro do leito. Quando a gaseificação de biomassa no RLFB ocorre, o leito apresenta 3 fases: pedaços de biomassa com densidade ρ_b , partículas inertes com densidade ρ_p e o gás de fluidização com densidade ρ_g . A concentração de biomassa no leito, altera o valor de U_{mf} , como em Rao et al (2001), e por consequência a fluidodinâmica através da relação (U_f / U_{mf}) . A qualidade do gás gerado é determinada pelas

características e quantidade de biomassa alimentada junto com o fator de ar, como em Andrade et al (2007); a vazão de ar e a dinâmica do leito através da U_f resultante.

Quando trabalhamos com um leito de partículas sólidas, observamos que o leito oferece resistência ao escoamento do fluido através dele. Ao aumentarmos a velocidade de escoamento, aumenta também a força de arrasto exercida sobre as partículas. Enquanto o fluido escoa através do leito, a força de arrasto obriga as partículas a se rearranjarem, oferecendo menor resistência ao escoamento. Se continuarmos a aumentar a velocidade do fluido, iniciaremos um estágio em que as forças de arrasto serão suficientes para suportar o peso das partículas do leito. Chamamos esse estado de fluidização incipiente, onde o sistema fluido-partícula se comporta como um fluido e a velocidade do fluido nesse ponto é denominada velocidade mínima de fluidização U_{mf} .

Ao inserir o gás com velocidades maiores que U_{mf} , a perda de carga através do leito (Figura 1) atinge um valor igual a razão entre o peso efetivo do leito, e sua área da secção transversal. O valor da perda de carga se mantém aproximadamente constante durante o intervalo de velocidades do gás, entre U_{mf} e a velocidade de transporte das partículas do leito, que pode ser estimado por:

$$\Delta P_{leito} \cdot A_T = (m/\rho_p) (\rho_p - \rho_g)g \quad (1)$$

Onde:

ΔP_{leito} é a perda de carga através do leito

m , é a massa do conjunto de partículas do leito

ρ_p , é a densidade do material do leito

ρ_g , é a densidade do gás de fluidização

A_T , é área da secção transversal do leito, e

g , é aceleração da gravidade.

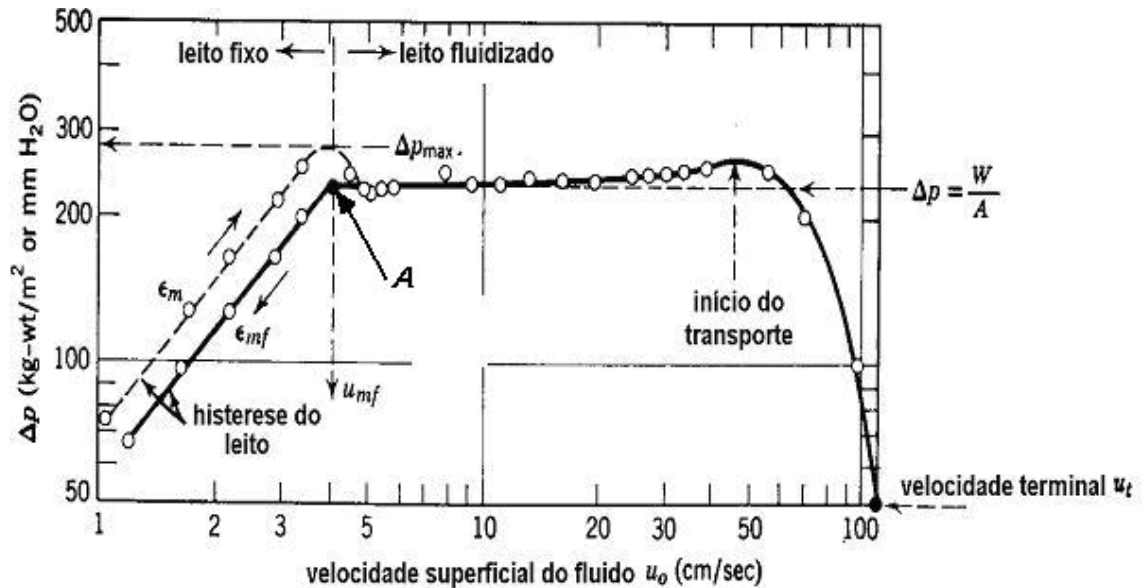


Figura 1: Gráfico de perda de carga em função da velocidade do fluido.
(Kunii&Levenspiel, 1991).

Até o início da fluidização, o leito é expandido mais ou menos uniformemente, não importando se o fluido é um líquido ou um gás. Porém, se o fluido é um gás, essa expansão uniforme é subitamente perdida (exceto para partículas muito finas $d_p < 0,1\text{mm}$), e o sistema se torna instável, apresentando vazios contendo poucos sólidos dentro do leito, e sendo preenchidos quase totalmente por gás de fluidização, sendo chamados de bolhas. As bolhas aumentam a recirculação das partículas dentro do leito; sendo responsáveis por oferecer excelentes propriedades de transferência de calor do sistema fluidizado.

Ao elevar a velocidade do fluido além do regime de bolhas, o leito inicia uma condição onde as partículas são arrastadas na corrente e carregadas para fora do leito (Figuras 1 e 2). As partículas menores são elutriadas a velocidades menores do que as necessárias para elutrir partículas maiores, e a maneira como as bolhas “explodem” na superfície do leito, lançando jatos de sólidos no espaço acima do leito, afeta consideravelmente a taxa de perda de partículas por elutriação (Figura 2: Slugging).

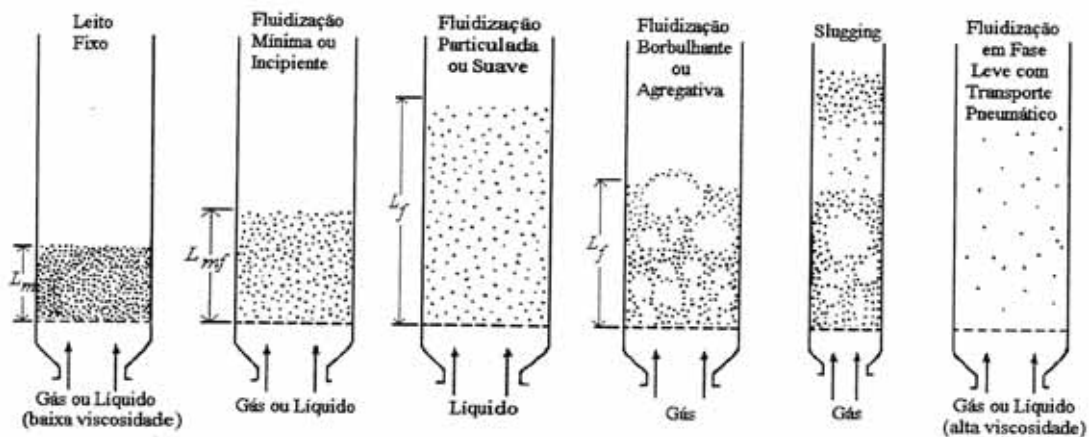


Figura 2: Comportamento do leito de partículas, em função do aumento da velocidade do fluido. (Kunii & Levenspiel, 1991).

Entre as condições extremas do leito fixo e a de carregamento e transporte de partículas temos o regime de leito fluidizado borbulhante, em que a perda de carga através do leito é aproximadamente constante e suficiente para suportar o peso do leito e em seguida, iniciar a formação de bolhas. A ação das bolhas provoca o alto grau de mistura das partículas no leito, e a grande área superficial exposta por elas são responsáveis por atingir rapidamente o equilíbrio térmico entre os sólidos e o gás. Por causa de sua alta capacidade térmica em relação ao gás, as partículas no leito, sejam de combustível ou de sólidos inertes, agem como fontes ou sorvedores de calor. Para a obtenção de boas taxas de transferência de calor e a rápida mistura dos sólidos, em geral opera-se o reator com velocidades adequadamente maiores do que a U_{mf} .

A interação entre as bolhas com a fase densa (emulsão), dentro do leito é determinada pela densidade e granulometria do material particulado de que este é constituído. Isto pode ser mais bem entendido pela classificação proposta por Geldart (1972); na Figura 3, onde U_B é a velocidade de subida da bolha, U_{mB} é a velocidade mínima para a ocorrência das bolhas e ϵ_{mf} é a porosidade do leito na condição de fluidização mínima.

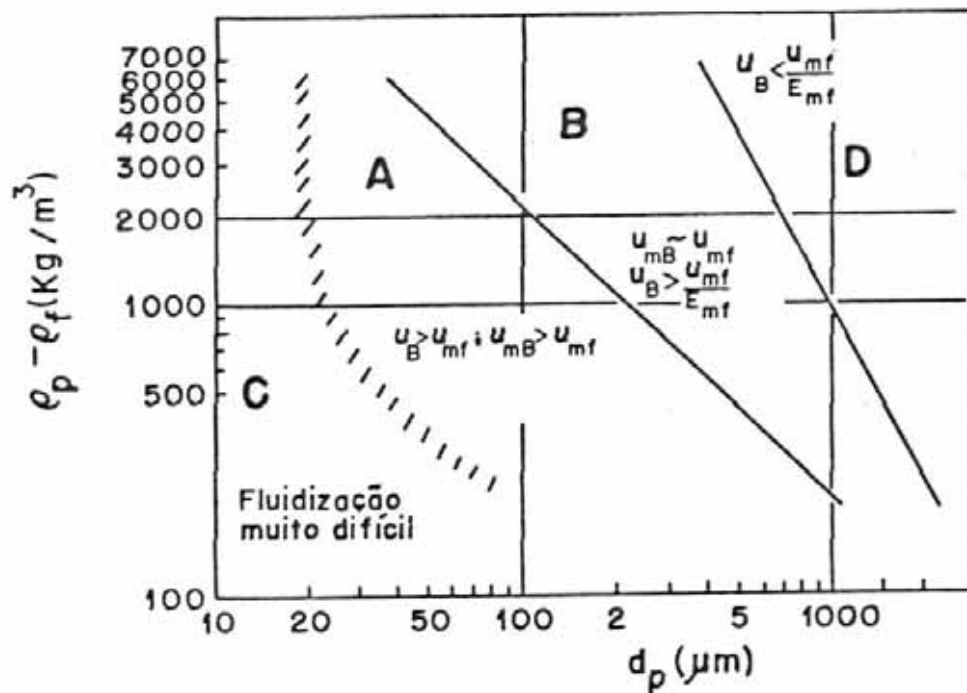


Figura 3: Diagrama de Geldart, para classificação do material particulado do leito, Geldart (1972).

Em C: as partículas são muito pequenas e de materiais diversos; com valores de densidade muito diferentes; a exemplo de pó de vidro (Saleh et all, 2006) e farinha de trigo. As forças entre as partículas são maiores que as forças viscosas devido ao fluido; tornando a fluidização muito difícil.

Em A, estão partículas que apresentam fluidização iniciando para velocidade do gás igual a U_{mf} , inicialmente dando origem a um regime de fluidização homogênea sem bolhas, com expansão considerável do leito; e depois iniciando a formação de bolhas para U_{mb} . As forças entre partículas são fracas.

Em B, as forças coesivas entre partículas são desprezíveis; e as bolhas podem se originar logo após se atingir valores de velocidade do gás acima de U_{mf} . Este grupo apresenta como característica uma boa fluidização borbulhante, com excelente recirculação dentro do leito. Material típico deste grupo seria areia.

E por fim, em D, estão partículas grandes (tipicamente maiores de 1mm); com facilidade de formação de jorros para leitos profundos. Exemplos deste tipo seriam grãos de milho ou de café, e mesmo areia para d_p maior de 1mm.

Na maioria das aplicações de leito fluidizado para a queima e gaseificação, o material inerte do leito pertence aos tipos B e D.

Associado às interações entre a fase de bolhas e a de emulsão, estudos experimentais de Lewis e Partridge (1967), Cranfield e Geldart (1974), mostraram que o padrão de escoamento de um gás associado com uma bolha, depende da razão entre

velocidade desubida da bolha U_B , e a velocidade de mínima fluidização U_{mf} . Para razão $U_B/(U_{mf}/E_{mf})$, maior do que a unidade, i.e., para bolhas rápidas, forma-se uma região de recirculação de gás na fronteira da bolha com a fase densa. O gás na bolha recircula em seu interior e tem pequena penetração na fase densa. Quando a razão $U_B/(U_{mf}/E_{mf})$ é menor do que a unidade, i.e., para bolhas lentas, os gases da emulsão passam através da bolha, entrando pela sua base e saindo pelo topo, como mostrado na Figura 4. (SANTOS, 2010, p. 272 a p. 274)

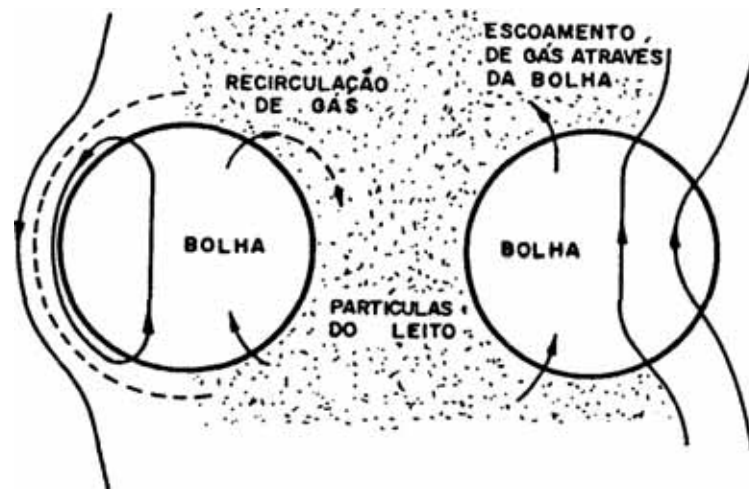


Figura 4: Escoamento do gás de fluidização associado à fase de bolhas; a) à esquerda, bolha com $U_B/(U_{mf}/E_{mf}) > 1$, b) à direita, bolha com $U_B/(U_{mf}/E_{mf}) < 1$.

Ao desenvolver um estudo da transferência de massa dentro do RLFB, deve-se conhecer as características do escoamento do gás dentro das bolhas (rápidas ou lentas); pois se $U_B/(U_{mf}/E_{mf}) > 1$, implica em acrescentar uma etapa de difusão dos gases dentro da bolha para a emulsão, como em Avedesianand Davidson (1973), pois a concentração de O_2 dentro da bolha será diferente daquela na emulsão. Para $U_B/(U_{mf}/E_{mf}) < 1$, espera-se que a concentração dos gases nas duas fases seja a mesma.

2.2 Grandezas básicas

A seguir, definiremos alguns parâmetros relacionados ao comportamento do leito fluidizado.

Porosidade do Leito: Determina-se a porosidade do leito pela razão entre o volume de espaço vazio e o volume total do leito:

$$\varepsilon = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{m_s}{\rho_s AL} \quad (2)$$

Onde,

V = volume do leito

V_s = volume de sólidos

m_s = massa dos sólidos dentro do leito

A = área da secção transversal do leito

L = altura do leito

ρ_s = densidade do sólido

Expansão do leito: É dada pela variação do volume do leito, em relação ao seu volume na condição de mínima fluidização. Devido à área de secção transversal constante; o percentual de expansão é calculado em termos da variação da altura do leito:

$$E = \frac{L - L_{mf}}{L_{mf}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Para a fração de vazios na fase de emulsão, muitos trabalhos (Sriramuluet al., (1996); Srinivasan et al., (1998); Kulasekaran et al., (1999)) adotaram a teoria das fases: admiti-se que a fase de emulsão apresenta uma fração de vazios idêntica a da condição de mínima fluidização e é independente da velocidade superficial de fluidização. As correlações publicadas na literatura para expansão de leitos fluidizados são geralmente baseadas em: Teoria das duas fases Lewis et al. (1951) e Shen e Johnstone, (1955); Teoria das duas fases e propriedades das bolhas Bakker e Heertjes, (1980); semelhança da fluidização particulada com sedimentação Richardson e Zaki, (1954). (SANTOS, 2010, p. 275).

Relaciona-se para a estimativa da altura do leito expandido a variação do diâmetro e velocidade das bolhas, a velocidade superficial do gás de fluidização e a velocidade mínima de fluidização, com as propriedades das partículas do leito e com as propriedades do fluido e diâmetro do leito. A altura nas condições de mínima fluidização pode ser determinada por:

$$H_{mf} = \frac{Mi}{\rho_s A(1 - \varepsilon_{mf})} \quad (4)$$

Existem algumas correlações publicadas na literatura para estimar a expansão de leitos fluidizados. Algumas delas estão apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Correlações para prever a expansão do leito fluidizado.

Referência	Correlações	Observações
Leva, (1957)	$H = H_{mf} \frac{U_{mf}}{U_0} \left[\frac{(1 - \varepsilon)^2 \varepsilon_{mf}^3}{(1 - \varepsilon_{mf})^2 \varepsilon^3} \right]^m$	Agente fluidizante: ar e CO ₂ . Partícula areia. Diâmetro do leito 6 e 12 cm
Lewis et al., (1951)	$H = H_{mf} - \frac{0,0187(U_0 - U_{mf})}{d_p^{0,5}}$	Agente fluidizante: ar e água. Partícula vidro.
Bakker e Jonhstone, (1955)	$H = H_{mf} + \frac{0,0188(U_0 - U_{mf})}{d_p^{0,5}}$	-
Babu et al., (1978)	$H = H_{mf} + \frac{0,762(U_0 - U_{mf})^{0,57} \rho_g^{0,083}}{\rho_s^{0,166} U_{mf}^{0,063} D^{0,445}}$	Agente fluidizante: ar Partícula areia, carvão, calcário, biomassa. Diâmetro ≤ 6 cm
Babu et al., (1978)	$H = H_{mf} + \frac{10,978(U_0 - U_{mf})^{0,738} d_p^{1,006} \rho_s^{0,376}}{U_{mf}^{0,937} \rho_g^{0,126}}$	Agente fluidizante: ar Partícula areia, carvão, calcário, biomassa. Diâmetro > 6 cm

Tamanho e forma das partículas: No reator de leito fluidizado, há presença de uma grande diversidade de formas, tamanhos, densidade e distribuição granulométrica das partículas sólidas de interesse. Esses parâmetros são fundamentais por determinarem o comportamento fluidodinâmico do leito, porém, deve-se estabelecer definições de formas regulares, segundo Geldart (1986), para padronizar os trabalhos com material particulado.

d_p , diâmetro de peneira: é igual a lateral da abertura de peneira, pela qual a partícula passa.

d_v , diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da partícula.

d_s , diâmetro de uma esfera com a mesma superfície da partícula.

d_{sv} , diâmetro de uma esfera com a mesma razão área/volume, que a partícula.

Esfericidade Ψ , é definida como:

$$\Psi = \frac{A_{sv}}{A_p} \quad (5)$$

Onde:

A_{sv} : área da superfície externa de uma esfera com mesmo volume da partícula.

A_p : área da superfície externa da partícula.

A partir dessa definição, calcula-se a esfericidade e em seguida o valor do diâmetro equivalente da partícula, dado por:

$$d_e = \Psi \cdot d_p \quad (6)$$

Para materiais granulares de formas irregulares como areia, alumina, torna-se difícil determinar a área e o volume das partículas. Peçanha e Massarani (1986) propuseram outra maneira de determinar a esfericidade sendo a razão entre os diâmetros de um círculo inscrito e o círculo circunscrito na área transversal da partícula. Então:

$$\Psi = \frac{d_i}{d_c}, \quad (7)$$

Onde

d_i = diâmetro do círculo inscrito e,

d_c = diâmetro do círculo circunscrito

Velocidade mínima de fluidização: A velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) é extremamente importante de ser calculada ou determinada experimentalmente para o projeto de um reator LFB, pois mesmo que hajam limitações quanto à precisão (cerca de 20%), seu valor antecipa dados de dimensionamento e operação do reator.

Pode-se obter a U_{mf} pelas medidas da perda de carga através do leito, em função da velocidade do gás como mostrada na Figura 1; ou por meio de fórmulas empíricas como a equação de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{d_{sv}^2} + 1,75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U^2}{d_{sv}} \quad (11)$$

Seguindo o procedimento descrito em Geldart (1986), usando, $U=U_{mf}$, e

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (12)$$

Combinamos as equações (11) e (12), para obtermos:

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_v} \left\{ (1135,7 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,7 \right\} \quad (13)$$

Onde, Ar é denominado número de Arquimedes, e calcula-se como:

$$Ar = \frac{\rho_g d_v^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (14)$$

Pode-se utilizar a equação (13) para partículas do tipo B e D, além disso, ela descreve uma boa maneira de calcular U_{mf} para um leito formado por partículas de formas regulares, ou que possam ser bem caracterizadas pelo uso da equação (10).

No entanto, como descrito em Marzochella e Salatino (2000), para materiais caracterizados por misturas binárias formadas por sólidos de mesma densidade, com dp_1 e dp_2 diferentes, com $dp_2 = 4dp_1$, o leito apresenta um estado de fluidização transiente entre um valor de velocidade de fluidização incipiente U_1 , e uma velocidade de fluidização

completa U_2 . Para velocidades do gás entre U_1 e U_2 ; o leito inicialmente com fluidização uniforme, pode apresentar segregação da componente com d_p maior desfluidizada ao fundo do leito, e uma camada superior fluidizada constituída principalmente pela componente de menor d_p . Para velocidades do gás acima de U_2 , todo o leito se apresenta com fluidização uniforme e estável. Não há uma relação direta entre o valor de U_1 com a U_{mf} da componente com característica “flotsam”, nem de U_2 com a U_{mf} da componente “jetsam”. O melhor comportamento fluidodinâmico do leito será descrito pela determinação da velocidade de fluidização completa. (SANTOS, 2010, p. 275).

Mistura e segregação (adaptado de Bayerns and Geldart, 1986): Quando tratamos da mistura em relação a um RLFB, esta relaciona-se com a distribuição das partículas sólidas dentro de leito. Em um conjunto de partículas sólidas com mesma densidade, a mistura apresenta boa qualidade se for caracterizada por uma distribuição relativamente homogênea, de partículas de tamanhos diferentes distribuídas em todo o volume do leito.

Entretanto, a segregação que também está presente em um RLFB, se opõe às características da mistura, pois ocorre quando por fatores diversos, um conjunto de partículas sólidas apresenta uma distribuição não homogênea dentro do leito. Em função da posição dentro do leito, as partículas que apresentam segregação, são denominadas “jetsam” quando apresentam a característica de afundarem dentro do leito; e de “flotsam”, quando apresentam a tendência de flutuarem acima do leito ou próximo à sua superfície. E para calcular a medida da segregação dentro do leito, devemos utilizar:

$$C_s = \left(\frac{x_F - x_T}{x_F + x_T} \right) \cdot 100\% \quad (19)$$

Onde,

x_F e x_T , são as concentrações do sólido de interesse, nas metades inferior e superior do leito, respectivamente.

C_s é o coeficiente de segregação, e pode ter valores entre -100 e +100% (o

valor 0% corresponde a uma mistura perfeita).

Define-se *índice de mistura* M_i como a razão $\frac{x}{\bar{x}}$, onde x é a concentração do material considerado, em um nível do leito; e $\bar{x}$ é sua concentração média.

A qualidade da mistura dentro do leito pode influenciar:

- O contato gás-sólido;
- O gradiente térmico dentre as regiões do leito;
- O coeficiente de transferência de calor;
- A posição e o número de pontos de alimentação e retirada de sólidos;
- A presença e a extensão de zonas não fluidizadas próximas ao distribuidor;

Os problemas de mistura em um leito fluidizado podem ser classificados em quatro categorias:

1. Partículas com mesmo tamanho e densidade.
2. Partículas com mesmo tamanho e densidades diferentes.
3. Partículas com mesma densidade, porém com tamanhos diferentes.
4. Partículas com tamanho e densidades variáveis; i.e., pequenas e pesadas; grandes e leves; pequenas e leves e grandes e pesadas.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL I

Após a realização dos estudos a respeito da fluidodinâmica de um leito fluidizado gás – sólido, dos conceitos básicos envolvidos em seu comportamento e das grandezas básicas referentes aos parâmetros contidos no leito fluidizado, inicia-se a descrição do procedimento experimental I, responsável por servir como conhecimento prévio para podermos alcançar a proposta desse trabalho.

3.1 Montagem experimental I

Vimos anteriormente que para atingirmos a fluidização incipiente do leito (para que este se comporte como um fluido), deve-se atingir a velocidade mínima de fluidização U_{mf} . Experimentalmente, a maneira encontrada para atingi-lo consiste na montagem do seguinte sistema:

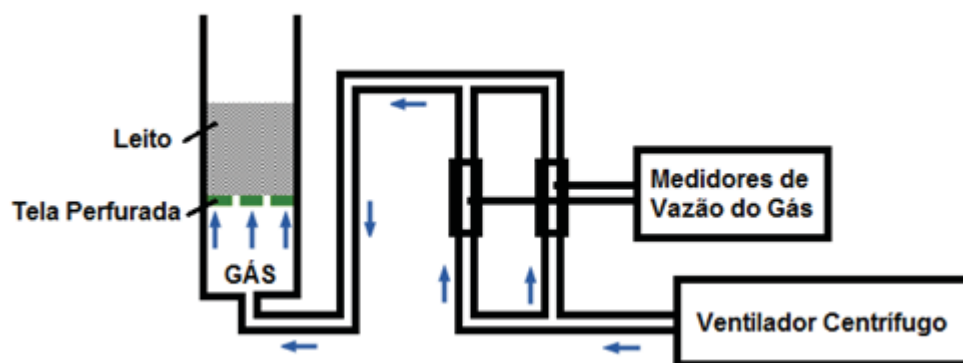


Figura 5: Montagem Experimental

Em que, o ventilador centrífugo (Figura 6) injeta o gás (ar) no sistema e este percorre os tubos onde estão os medidores de vazão do gás (Figura 7 - Rotâmetros), que são responsáveis por permitir a passagem do gás para a vazão ajustada no medidor. A vazão de gás percorre o restante do sistema até atingir a tela perfurada, onde será distribuído uniformemente e entrará em contato com o leito (Figura 8). Local onde ocorrerá o fenômeno de fluidização. Apesar de não estar esquematizado acima, há ainda um painel acoplado ao tubo onde está o leito (Figura 8), constituído por duas mangueiras com água (manômetro de coluna de água) que nos permite determinar a velocidade do gás inserido a fim de encontrar a velocidade mínima de fluidização U_{mf} do leito.



Figura 6: Ventilador centrífugo



Figura 7: Rotâmetros



Figura 8: Em A: Mini leito frio fluidizado; Em B: Manômetro de coluna de água.

3.2 Método I: Determinação das grandezas básicas

Velocidade mínima de fluidização U_{mf} : Para encontrarmos a velocidade mínima de fluidização U_{mf} , colocamos o material a ser analisado (esferas de vidro, areia ou alumina) no mini leito. As características desse conjunto são:

- Tubo de quartzo – diâmetro interno: 7,5 cm; altura total: 45,8 cm;
- Altura do leito fixo: 7,0cm;

Em seguida, ligamos o ventilador centrífugo para que inicie a injeção de ar no tubo e ajustamos o Rotâmetro para a vazão inicial de 0,25 m³/H; observamos o deslocamento da coluna de água na mangueira da esquerda (Figura 8) e fazemos a marcação no ponto em que a coluna de água se estabiliza. Repetimos esse processo, aumentamos a vazão de ar agora para 0,5 m³/H e marcamos o ponto em

que a coluna de água se estabiliza novamente. Continuamos a aumentar a vazão de ar em 0,25 m³/H e fazer as marcações da coluna de água até o momento em que o deslocamento da água diminui em vez de aumentar. Nesse ponto, o mini leito começa a apresentar fluidização, e concluímos que a velocidade mínima de fluidização U_{mf} foi alcançada. E, para calcular seu valor em metros por segundo (m/s):

$$\text{Vazão de ar } \left(\frac{m^3}{H}\right) = \frac{m^3}{3.600s} = \frac{m^3}{s \cdot \text{Área } (m^2)} = U_{mf} \left(\frac{m}{s}\right) \quad (20)$$

Densidade real do leito ρ (real): Determinamos a densidade real do leito com o auxílio de uma balança semi analítica; colocamos um recipiente graduado em ml sobre a balança e descontamos o valor de sua massa. Adicionamos 200 ml do material do leito no recipiente e anotamos o valor de sua massa. Retiramos esse recipiente e colocamos outro com a mesma graduação com 200 ml de água e anotamos o valor da massa de água. Em seguida, colocamos a água no recipiente em que está o material do leito e anotamos o valor do conjunto. Com essas informações, determinamos a densidade real do leito:

$$\rho \text{ (real)} = \frac{m \text{ (g)}}{V \text{ (cm}^3\text{)}} = \frac{\text{massa do material do leito (g)}}{(200 \text{ ml de água} - \text{massa de água em 200 ml})} \quad (21)$$

As informações obtidas para a velocidade mínima de fluidização U_{mf} e para a densidade do leito serão utilizadas na próxima seção.

3.3 Análise I: Comparação dos materiais: esferas de vidro, alumina e areia.

A fim de identificar os diferentes comportamentos de um leito fluidizado com diferentes materiais no leito, iniciaremos uma comparação referente à velocidade mínima de fluidização U_{mf} de cada um deles (esferas de vidro, alumina e areia). Deve-se considerar a densidade real (determinada em laboratório pelo método I descrito na seção anterior desde capítulo) e a granulometria dos materiais utilizados no leito para a comparação.

Abaixo estão os resultados coletados em laboratório que caracterizam o comportamento da fluidização dos três materiais analisados.

- Areia:
 - o Densidade real = $2,5 \text{ g/cm}^3$
 - o Granulometria = $(0,35 - 0,5) \text{ mm}$

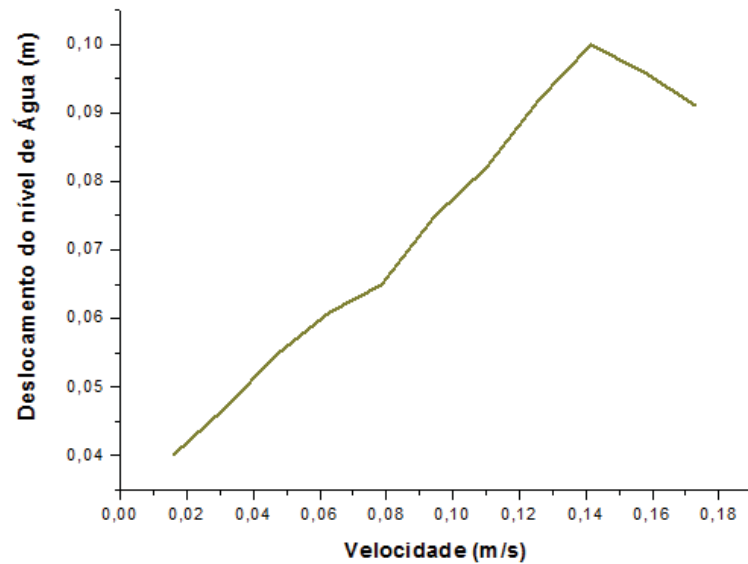


Figura 9: Gráfico da fluidização da areia

- Alumina:
 - o Densidade real = $3,06 \text{ g/cm}^3$
 - o Granulometria = $(0,25 - 0,5) \text{ mm}$

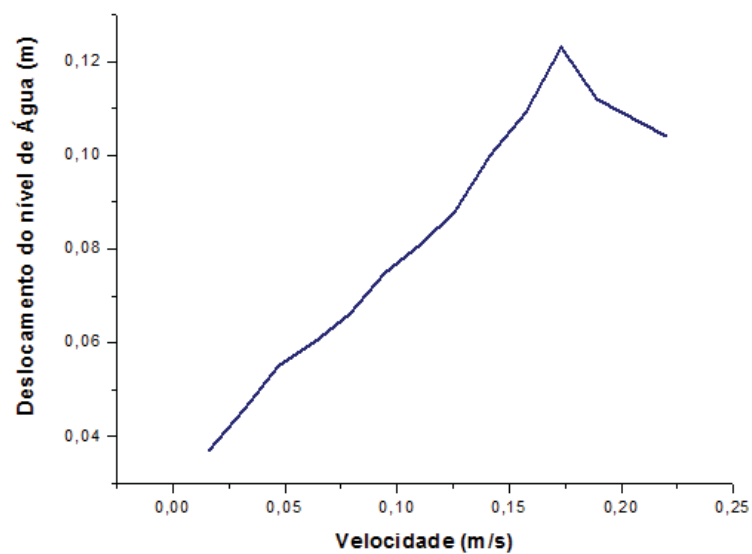


Figura 10: Gráfico da fluidização da alumina

- Esferas de vidro
 - o Densidade real = 2,51 g/cm³
 - o Granulometria = 1,0 mm

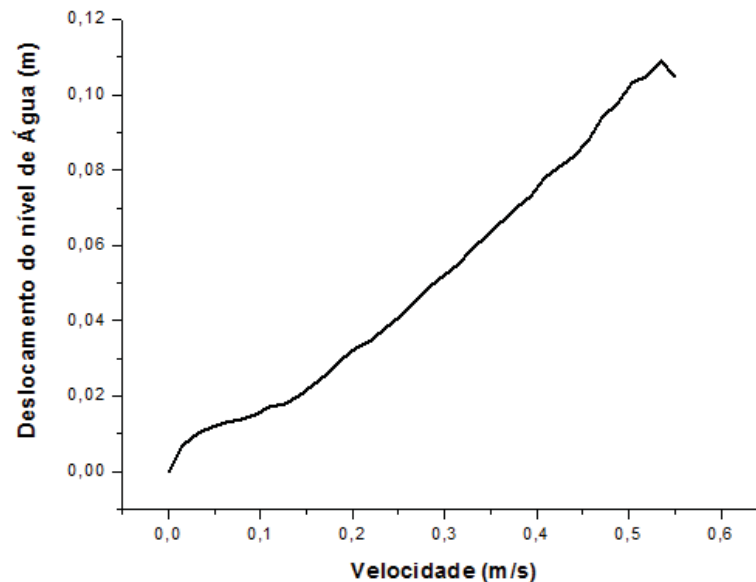


Figura 11: Gráfico da fluidização das esferas de vidro

O ponto máximo observado nos gráficos representa a velocidade mínima de fluidização do material. Nos materiais analisados, temos as seguintes velocidades mínimas de fluidização (U_{mf}):

- Areia: $U_{mf} = 0,142$ m/s
- Alumina: $U_{mf} = 0,173$ m/s
- Esferas de vidro: $U_{mf} = 0,535$ m/s

Segundo as características do material que levamos em consideração, densidade e granulometria, a diferença entre as velocidades mínimas de fluidização dos três materiais analisados, areia, alumina e esferas de vidro, podem ocorrer:

- Hipótese 1: devido as diferentes densidades dos materiais;

A densidade real, determinada em laboratório, das esferas de vidro ($\rho = 2,51$ g/cm³) e da areia ($\rho = 2,5$ g/cm³) são muito semelhantes, porém suas velocidades mínimas de fluidização diferem consideravelmente, U_{mf} da areia = 0,142 m/s e U_{mf} esf. de vidro = 0,535 m/s, o que nos permite concluir que a densidade não é um parâmetro

que influencia diretamente na diferença da velocidade mínima de fluidização dos três materiais analisados e possivelmente de outros materiais.

- Hipótese 2: devido as diferentes granulometria dos materiais;

As diferentes granulometrias envolvidas nas análises experimentais, areia (0,35 – 0,5) mm, alumina (0,25 – 0,5) mm e esferas de vidro (0,1 mm), nos permite observar as velocidades mínimas de fluidização sob o ponto de vista de que conforme a granulometria do material aumenta a velocidade mínima de fluidização do leito também aumenta, ou seja, o leito demora mais tempo para atingir a fluidização incipiente.

Isso ocorre devido ao fato de que quanto maior a granulometria do material, menor resistência é oferecida ao escoamento da corrente gasosa ao longo do leito, pois os componentes do material estão mais afastados uns dos outros, e a passagem do gás é facilitada. A velocidade do gás deve ser maior para que as forças de arrasto sejam suficientes para suportar o peso do leito. Devido a isso, por apresentar maior granulometria, as esferas de vidro necessitam de uma alta velocidade do gás para que o leito de gás – sólido seja fluidizado.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL II

Este capítulo será responsável por descrever o procedimento experimental II, de suma importância para a discussão proposta para esse trabalho, que além de fornecer o estudo da fluidodinâmica de um leito fluidizado, associado às condições para a boa mistura na distribuição de massa dentro do leito, visa apresentar resultados claros e concisos para quantificar a influência da força peso das partículas sólidas, das forças viscosas, e de empuxo no processo de fluidização e de mistura dentro do reator de leito fluidizado.

4.1 Montagem Experimental II

Em relação à montagem experimental I, o sistema utilizado agora é o mesmo descrito e apresentado na Figura 5. Porém, na montagem experimental II utilizamos um recipiente de leito mais profundo para suportar uma quantia maior de massa utilizada como leito, além das partículas sólidas de madeira que constituíram esse leito, e para melhor observação do fenômeno de fluidização no leito fluidizado gás - sólido. Para relembrar a montagem experimental, abaixo repetem as fotos dos componentes utilizados e a foto do novo recipiente de leito mais profundo com um dos materiais utilizados.

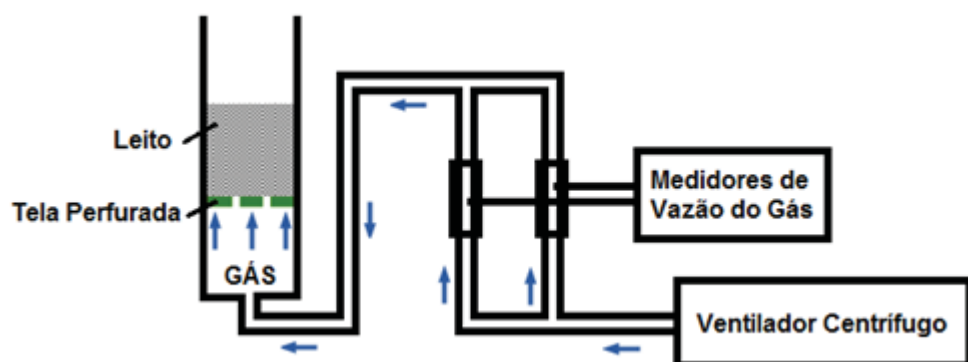


Figura 12: Montagem Experimental



Figura 13: Ventilador centrífugo



Figura 14: Rotômetros



Figura 15: Em B: Manômetro de coluna de água.

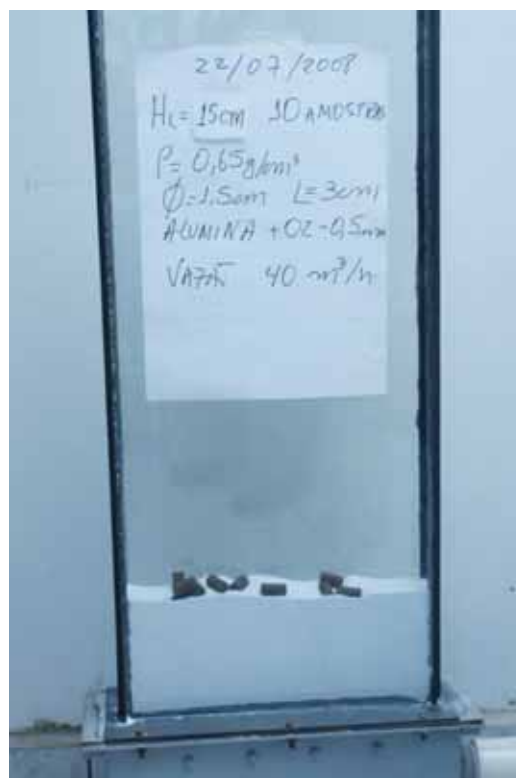


Figura 16: Recipiente de leito profundo com leito de alumina e amostras de madeira Imbuia

O ventilador centrífugo (Figura 13) injeta o gás (ar) no sistema e este percorre os rotâmetros que medirão a vazão de gás a ser injetada no leito (Figura 14 - Rotâmetros). A vazão de gás percorre o tubo e atinge a tela perfurada, onde será distribuído uniformemente e entrará em contato com o leito (Figura 16). Conforme aumentamos a vazão de gás, atingimos o estágio em que o leito sofre fluidização. Porém, para nossas análises a partir de agora, as vazões de gás utilizadas estão acima da velocidade mínima de fluidização U_{mf} do leito e este, constitui-se por uma alta turbulência entre o leito e as partículas sólidas em seu interior.

Para apresentar resultados relevantes para a discussão das forças que atuam sobre as partículas sólidas imersas no leito, utilizamos leitos de alumina e areia, sendo o leito de areia utilizado com dois tipos de granulometria (+0,25 -0,35) mm e (+0,35 -0,5) mm; três tipos de partículas sólidas com formato cilíndrico: caxeta, imbuia e muiracatiara; três diferentes diâmetros para cada um dos tipos de partículas sólidas (1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm) e três vazões de gás (40m³/H, 50m³/H e 60m³/H); e por se tratarem de três tipos de partículas sólidas, também levamos em consideração a densidade de cada tipo ($\rho_{\text{caxeta}} = 0,43 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{imbuia}} = 0,65 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_{\text{muiracatiara}} = 1,02 \text{ g/cm}^3$).

4.2 Método II: O método fotográfico

A utilização do método fotográfico foi o fator responsável para a realização das análises estatísticas que nos permitirá discutir mais à frente a influência dos parâmetros relacionados na atuação das forças físicas sobre as partículas sólidas imersas no leito.

Inicialmente, estipula-se a quantidade de partículas sólidas que serão observadas durante a fluidização do leito gás – sólido. Para a discussão deste trabalho, foram inseridas 10 amostras (partículas sólidas).

As amostras foram submetidas a dois leitos diferentes (areia e alumina) e a três diferentes condições de velocidade do gás no leito. Em cada condição foram tiradas 30 fotos, tomadas em intervalados de 3 segundos entre elas. A partir dessas fotos, houve uma contagem estatística das amostras fora da emulsão em cada condição. Porém, a escolha para esse número específico de fotos se deve ao fato

de que existe um número médio de fotos que nos permite confiar nos dados obtidos a partir das fotos para calcular a média das amostras fora da emulsão em cada condição do leite. O gráfico a seguir nos permite analisar qual a confiabilidade desse método para nossas análises estatísticas:

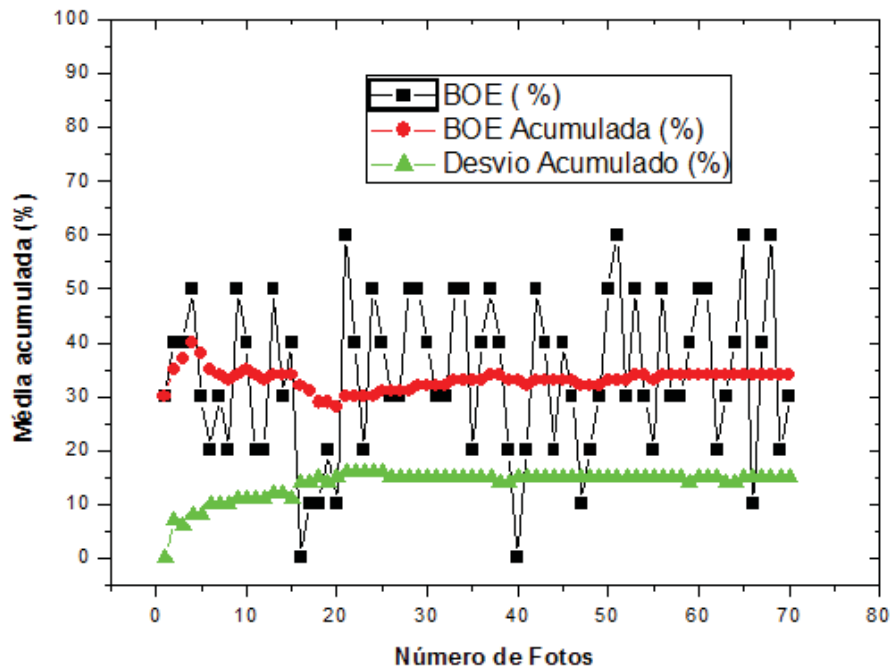


Figura 17: Gráfico do Método Fotográfico

O gráfico mostra a relação existente entre a média acumulada de amostras fora da emulsão do leite e a quantidade de fotos. A curva em preto trata-se da porcentagem de amostras fora da emulsão e a curva em vermelho, é a média acumulada dessa porcentagem de amostras fora da emulsão; e a curva em verde é o desvio acumulado da média.

Pode-se observar que a partir do número de 30 fotos tiradas de uma condição das amostras do leite, a curva da média acumulada começa a se regularizar, tendo pouca variação na média acumulada das amostras fora da emulsão, ou seja, a partir desse número de fotos há uma variação mínima no desvio acumulado. Desse modo, podemos concluir que o método fotográfico é confiável para nossas análises estatísticas a partir de 30 fotos.

Consideramos as amostras fora da emulsão do leite, ou seja, amostras que através da observação das fotos, estavam na região de bolha (bolhas de ar que se formam no leite) e na região de splash (amostras que eram jogadas para cima do

leito ou que podiam ser visualizadas acima do leito), fundamentadas em 2.1 Fluidodinâmica do leito fluidizado (adaptado de SANTOS, 2010, p. 269). Para exemplificar o método fotográfico, abaixo segue algumas fotos analisadas para a condição de leito fixo de alumina, com amostras de caxeta com 1,5 cm de diâmetro e vazão de ar do leito de $40\text{m}^3/\text{h}$:

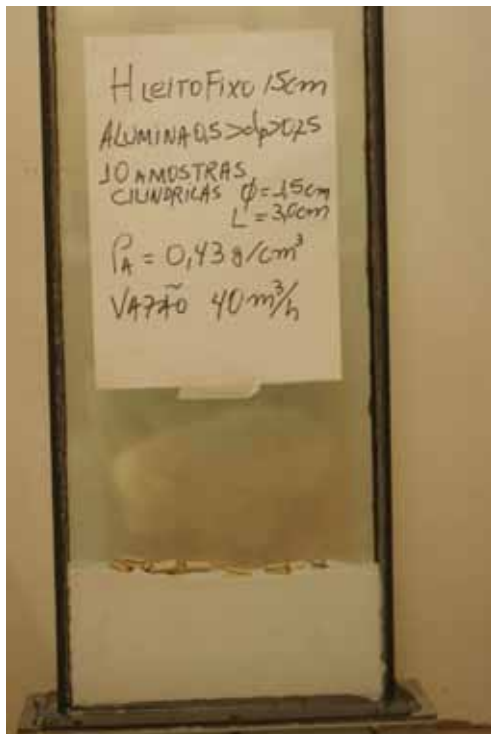


Figura 18: Foto inicial da condição a ser analisada



Figura 19: Amostras na região de "Splash" e "Bolha"

Cada uma dessas fotos nos permite calcular a porcentagem de amostras presentes fora da emulsão do leito e com isso, encontrar a média acumulada. Como exemplo, segue abaixo as análises estatísticas feitas para as amostras de caxeta com 1,5 cm de diâmetro:

Tabela 2: Análise das amostras de Caxeta com 1,5 cm de diâmetro

Nº de Fotos	Bolha	Splash	Emulsão
1	0	10	90
2	0	40	60
3	40	10	50
4	0	20	80
5	0	50	50
6	0	10	90
7	0	0	100
8	0	20	80
9	0	30	70
10	10	60	30
11	0	60	40
12	0	20	80
13	0	10	90
14	0	50	50
15	0	40	60
16	0	30	70
17	0	50	50
18	20	10	70
19	0	30	70
20	10	10	80
21	0	40	60
22	0	20	80
23	0	60	40
24	0	70	30
25	20	10	70
26	0	60	40
27	0	20	80
28	0	60	40
29	0	50	50
30	0	60	40
31	0	10	90
32	20	10	70
33	0	50	50
34	0	60	40
35	20	30	50
36	0	30	70
37	0	30	70
38	0	50	50
39	0	40	60
40	0	80	20
%	3,5	35	61,5

Apesar de estarem calculadas separadamente na tabela acima, a porcentagem de amostras presentes na bolha e no splash são utilizadas juntas, pois ambos estão presentes fora da emulsão do leite.

Essas análises estatísticas realizadas a partir do método fotográfico servirão de base para a discussão desse trabalho a respeito das forças que atuam sobre as amostras imersas no leito fluidizado gás – sólido. Portanto, a partir de agora, iremos analisar os resultados das análises gráficas e realizar comparações a respeito dos três tipos de partículas sólidas com formato cilíndrico: caxeta, imbuia e muiracatiara; três diferentes diâmetros para cada um dos tipos de partículas sólidas (1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm) e três vazões de gás (40m³/H, 50m³/H e 60m³/H); e por se tratarem de três tipos de partículas sólidas, considera-se a densidade de cada tipo de partícula ($\rho_{\text{caxeta}} = 0,43 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{imbuia}} = 0,65 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_{\text{muiracatiara}} = 1,02 \text{ g/cm}^3$).

4.3 Análise II: Amostras fora da emulsão (%) VS. Diâmetro das amostras

Nessa seção, apresenta-se o comportamento do leito fluidizado de alumina e areia para as amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara, considerando a alteração do diâmetro de cada amostra. Por exemplo, no leito de alumina e amostras de caxeta, iremos comparar o comportamento do leito quando as amostras de caxeta possuem diâmetro de 1,5 cm; com o comportamento do leito quando as amostras são substituídas pelas amostras de caxeta com diâmetro de 2,0 cm; e quando são novamente substituídas por amostras de caxeta com diâmetro de 3,0 cm.

Portanto, teremos as seguintes análises:

1. A - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm e amostras de *caxeta* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;
 B - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm e amostras de *imbuia* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;
 C - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm e amostras de *muiracatiara* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;
2. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm e amostras de *caxeta* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;
 B - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm e amostras de *imbuia* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;
 C - leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm e amostras de *muiracatiara* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;

3. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm e amostras de *caxeta* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;
B - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm e amostras de *imbuia* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;
C - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm e amostras de *muiracatiara* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm;

Em 1. A - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm e amostras de *caxeta* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos:

- Leito fixo de 15 cm contendo alumina com granulometria (+0,25 -0,5) mm;
- 10 amostras cilíndricas de madeira (*caxeta*) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 0,43 g/L;
- Vazão de ar de 40 m³/H, 50 m³/H e 60 m³/H;

Inserimos 15 cm de alumina e 10 amostras de *caxeta* de 1,5 cm de diâmetro no recipiente de leito profundo e iniciamos a inserção de vazão de ar até atingirmos 40 m³/H (Figura 20 e 23). A seguir, inicia-se o método fotográfico até atingirmos 30 fotos com 3 segundos de intervalo entre cada foto e repetimos esse método para as próximas vazões de ar de 50 m³/H (Figura 21 e 24) e de 60m³/H (Figura 22 e 25). Depois, substituímos as amostras de *caxeta* de 1,5 cm pelas amostras de *caxeta* com 2,0 cm de diâmetro (Figuras 26 a 31) e repetimos a injeção das vazões de ar e o método fotográfico. Por fim, substituímos as amostras de *caxeta* de 2,0 cm pelas amostras de *caxeta* com 3,0 cm de diâmetro (Figuras 32 a 34) e repetimos novamente o processo.

Alumina com amostras de caxeta (Diâmetro: 1,5 cm)

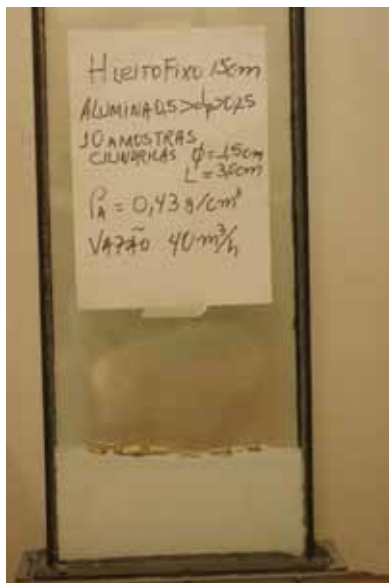


Figura 20: Informações do leito de 40 m³/H

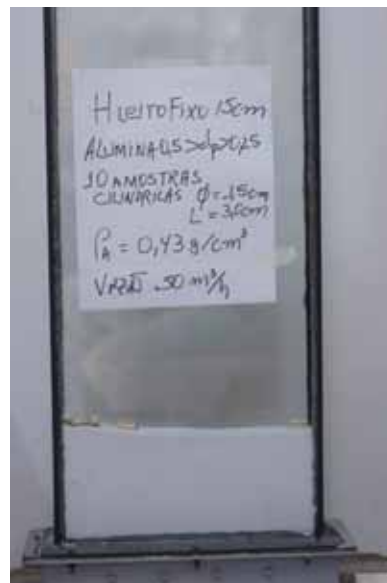


Figura 21: Informações do leito de 50 m³/H

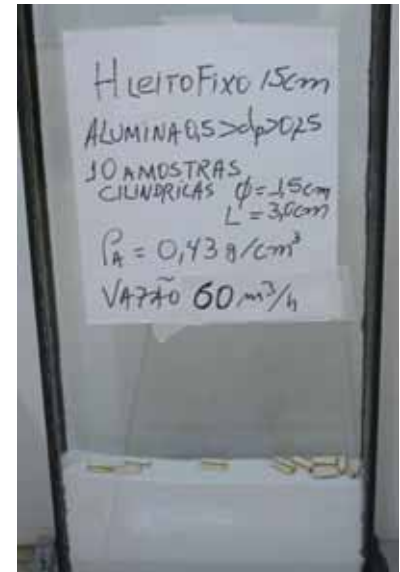


Figura 22: Informações do leito de 60 m³/H



Figura 23: Vazão de 40 m³/H



Figura 24: Vazão de 50 m³/H



Figura 25: Vazão de 60 m³/H

Alumina com amostras de caxeta (Diâmetro: 2,0 cm)



Figura 26: Informações do leito de 40 m³/H



Figura 27: Informações do leito de 50 m³/H



Figura 28: Informações do leito de 60 m³/H



Figura 29: Vazão de 40 m³/H



Figura 30: Vazão de 50 m³/H



Figura 31: Vazão de 60 m³/H

Alumina com amostras de caxeta (Diâmetro: 3,0 cm)

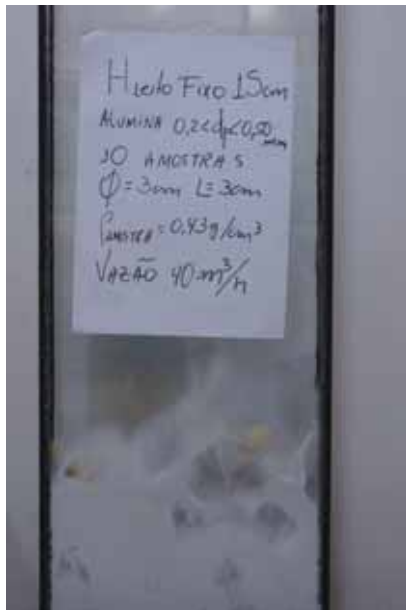


Figura 32: Informações do leito de 40 m³/H

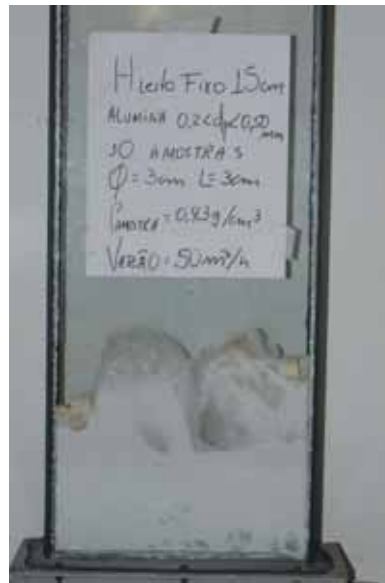


Figura 33: Informações do leito de 50 m³/H

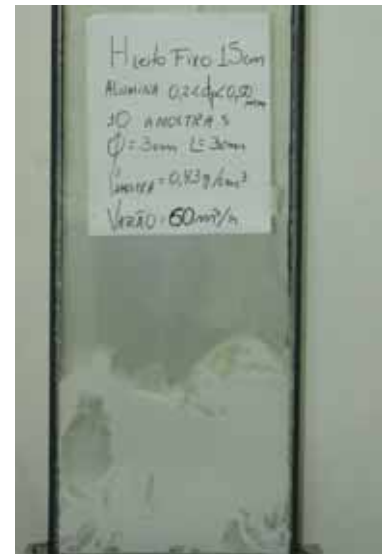


Figura 34: Informações do leito de 60 m³/H

Com as fotos são feitas as Tabelas com o número de amostras fora da emulsão, que permitem o cálculo da porcentagem de amostras fora da emulsão em cada situação do leito (Exemplo mostrado na Tabela 2 da seção 4.2 Método II: O método fotográfico). Após a construção dessas análises estatísticas para os três diferentes diâmetros das amostras de caxeta e as três diferentes vazões de ar, obtemos o seguinte gráfico; onde se relaciona a porcentagem de amostras fora da emulsão do leito e o diâmetro das amostras:

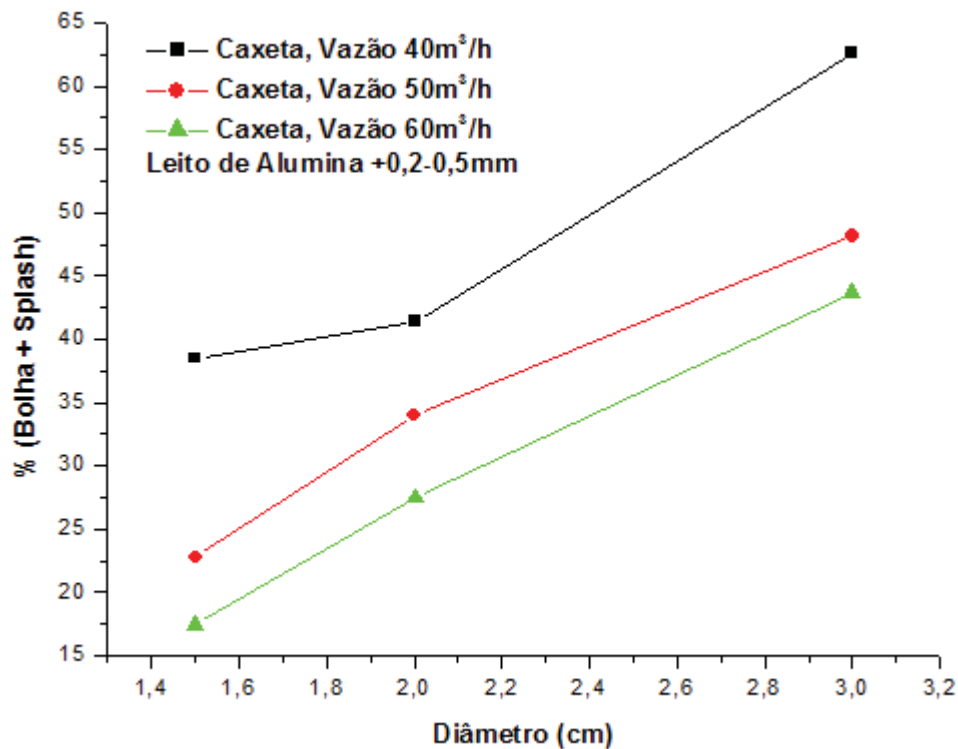


Figura 35: Gráfico do leito de alumina com amostras de Caxeta para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

O gráfico acima possui três curvas referentes às três vazões de ar inseridas no leito (40 m³/H, 50 m³ H e 60 m³/H). Porém, devemos nos atentar aos diferentes diâmetros das amostras. Como é possível observar no gráfico, conforme aumentamos o diâmetro das amostras de caxeta, a porcentagem de amostras presentes fora da emulsão do leito, para uma mesma vazão, também aumenta.

Em 1. B - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm e amostras de *imbuia* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos:

- Leito fixo de 15 cm contendo alumina com granulometria (+0,25 -0,5) mm;
- 10 amostras cilíndricas de madeira (imbuia) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 0,65g/L;
- Vazão de ar de 40 m³/H, 50 m³/H e 60 m³/H;

A partir de agora, iremos apenas substituir as amostras de caxeta com diâmetro de 3,0 cm por amostras de imbuia com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; e repetir o processo de injeção de gás no leito, o método fotográfico e a coleta de dados a partir das fotos para as análises estatísticas da porcentagem de amostras de imbuia fora da emulsão do leito. Abaixo constam as fotos para cada situação do leito de alumina com amostras de imbuia.

Alumina com amostras de imbuia (Diâmetro: 1,5 cm)

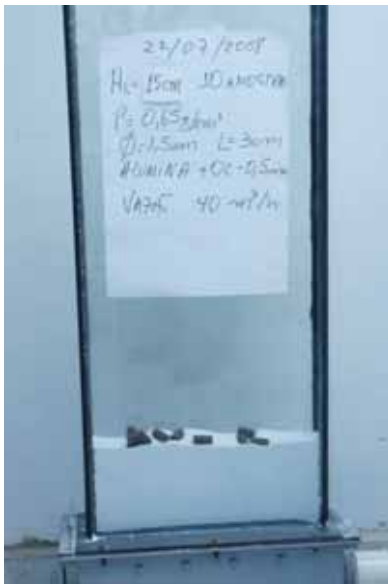


Figura 36: Informações do leito de 40 m³/H

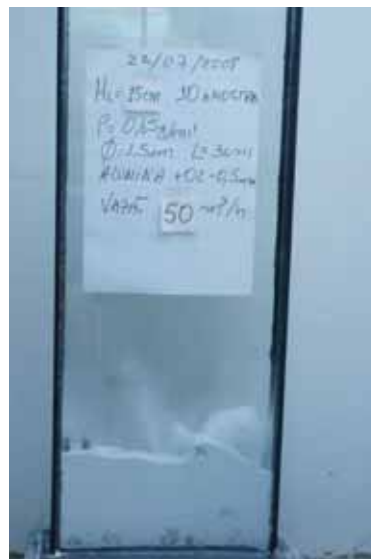


Figura 37: Informações do leito de 50 m³/H



Figura 38: Informações do leito de 60 m³/H



Figura 39: Vazão de 40 m³/H



Figura 40: Vazão de 50 m³/H



Figura 41: Vazão de 60 m³/H

Alumina com amostras de imbuia (Diâmetro: 2,0 cm)



Figura 42: Informações do leito de 40 m³/H



Figura 43: Informações do leito de 50 m³/H



Figura 44: Informações do leito de 60 m³/H



Figura 45: Vazão de 40 m³/H



Figura 46: Vazão de 50 m³/H



Figura 47: Vazão de 60 m³/H

Alumina com amostras de imbuia (Diâmetro: 3,0 cm)



Figura 48: Informações do leito de 40 m³/H



Figura 49: Informações do leito de 50 m³/H



Figura 50: Informações do leito de 60 m³/H



Figura 51: Vazão de 40 m³/H



Figura 52: Vazão de 50 m³/H



Figura 53: Vazão de 60 m³/H

Após a construção das análises estatísticas para os três diferentes diâmetros das amostras de imbuia e as três diferentes vazões de ar, obtemos o gráfico; onde se relaciona a porcentagem de amostras fora da emulsão do leito e o diâmetro das amostras:

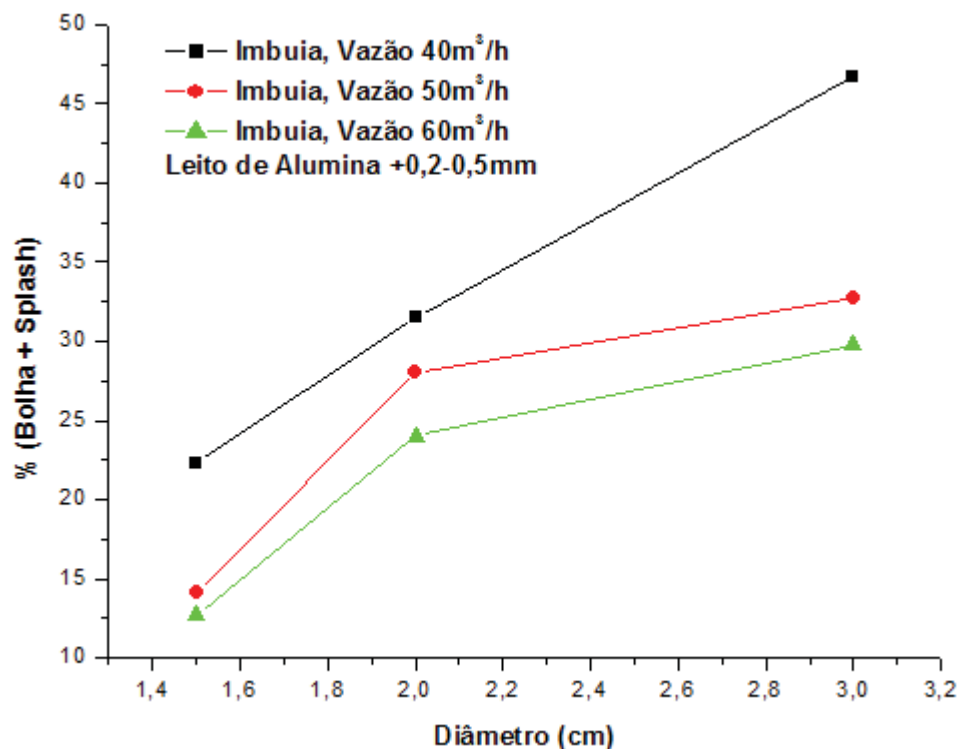


Figura 54: Gráfico do leito de alumina com amostras de Imbuia para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

Pelo gráfico acima, é possível observar o mesmo tipo de comportamento que no caso das amostras de caxeta: quando aumentamos a vazão de ar que atravessa o leito e diminuimos o diâmetro das amostras, a porcentagem de amostras fora da emulsão do leito diminui o que garante uma boa mistura do leito fluidizado.

Em 1. C - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm e amostras de *muiracatiara* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos:

- Leito fixo de 15 cm contendo alumina com granulometria (+0,25 -0,5) mm;
- 10 amostras cilíndricas de madeira (*muiracatiara*) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 1,02g/L;
- Vazão de ar de 40 m³/H, 50 m³/H e 60 m³/H;

Na última análise referente ao leito de alumina, iremos repetir o processo anterior (injeção de gás no leito, método fotográfico, coleta de dados a partir das

fotos para as análises estatísticas e sua representação gráfica), substituindo as amostras de imbuia com diâmetro de 3,0 cm por amostras de muiracatiara com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm. Infelizmente, para essa situação obtive somente as tabelas referentes à porcentagem de amostras fora da emulsão do leito do meu orientador, não havendo fotos para constarem aqui como visualização do comportamento do leito. Portanto, iremos nos atentar apenas à construção gráfica para os três diferentes diâmetros das amostras de muiracatiara e as três diferentes vazões de ar; onde estão relacionados, a porcentagem de amostras fora da emulsão do leito e o diâmetro das amostras:

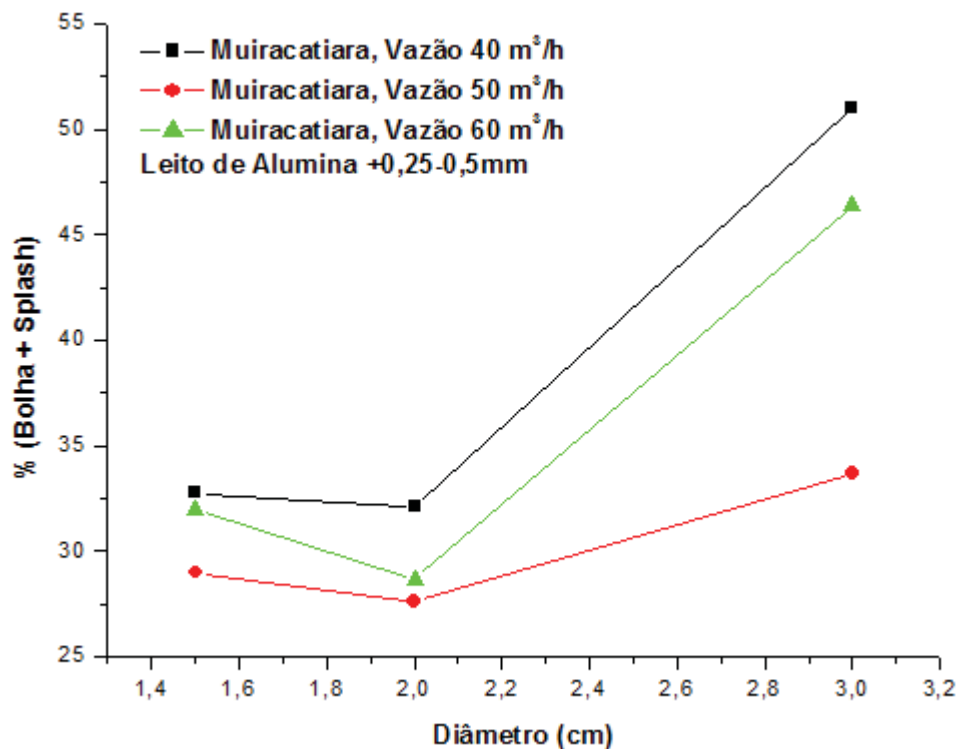


Figura 55: Gráfico do leito de alumina com amostras de Muiracatiara para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

Essa situação apresenta um comportamento curioso, diferente das amostras analisadas anteriormente. Observamos que se aumentarmos a vazão de ar no leito, a porcentagem de amostras fora da emulsão será menor para a vazão de 50 m³/ H e não de 60 m³/ H como vimos para os outros dois casos, independente do tamanho do diâmetro das amostras de muiracatiara. Esse comportamento pode estar relacionado com a densidade das amostras de muiracatiara, que será discutido na seção 4.4 Análise III: Amostras fora da emulsão (%) VS. Densidade das amostras.

Em 2. A - Leito de areia com granulometria (+0,25 -0,35) mm e amostras de caxeta com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos a substituição do leito alumina pelo leito de areia, com as seguintes características:

- Leito fixo de 15 cm contendo areia com granulometria (+0,25 -0,35) mm;
- 10 amostras cilíndricas de madeira (caxeta) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 0,43 g/L;
- Vazão de ar de 40 m³/H, 50 m³/H e 60 m³/H;

O processo para atingirmos a representação gráfica do comportamento do leito para esse tipo de amostras de madeira é o mesmo realizado para quando utilizamos o leito de alumina. Para visualização do leito de areia com as amostras de caxeta, segue abaixo as fotos e em seguida a representação gráfica desse comportamento:

Areia com amostras de caxeta (Diâmetro: 1,5 cm)



Figura 56: Vazão de 40 m³/H

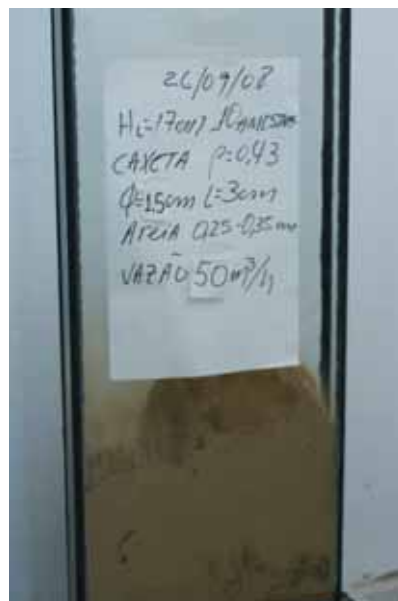


Figura 57: Informações do leito de 50 m³/H



Figura 58: Informações do leito de 60 m³/H

Areia com amostras de caxeta (Diâmetro: 2,0 cm)

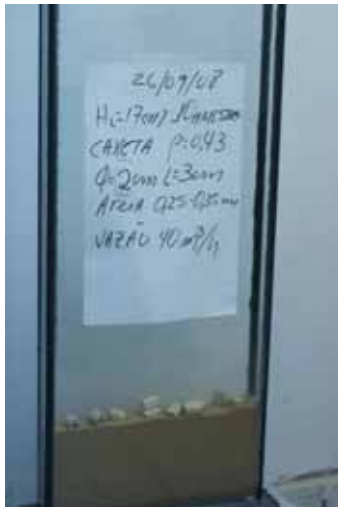


Figura 59: Informações do leito de 40 m³/H



Figura 60: Informações do leito de 50 m³/H

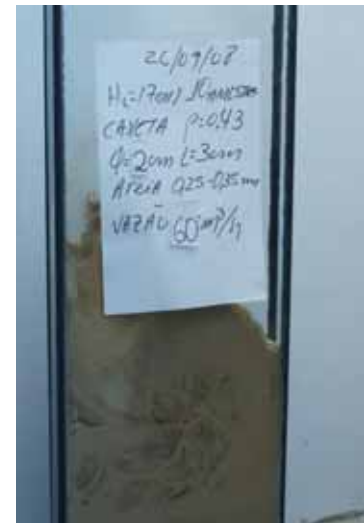


Figura 61: Informações do leito de 60 m³/H



Figura 62: Vazão de 40 m³/H



Figura 63: Vazão de 50 m³/H



Figura 64: Vazão de 60 m³/H

Areia com amostras de caxeta (Diâmetro: 3,0 cm)



Figura 65: Vazão de 40 m³/H

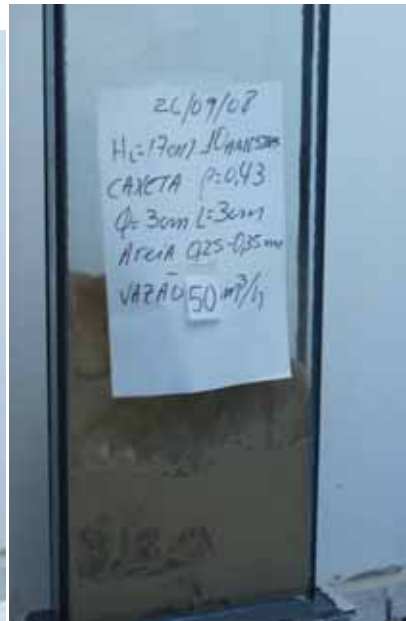


Figura 66: Informações do leito de 50 m³/H

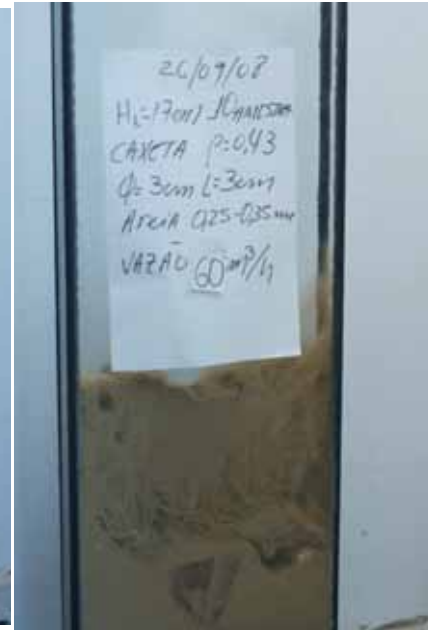


Figura 67: Informações do leito de 60 m³/H

- Representação gráfica:

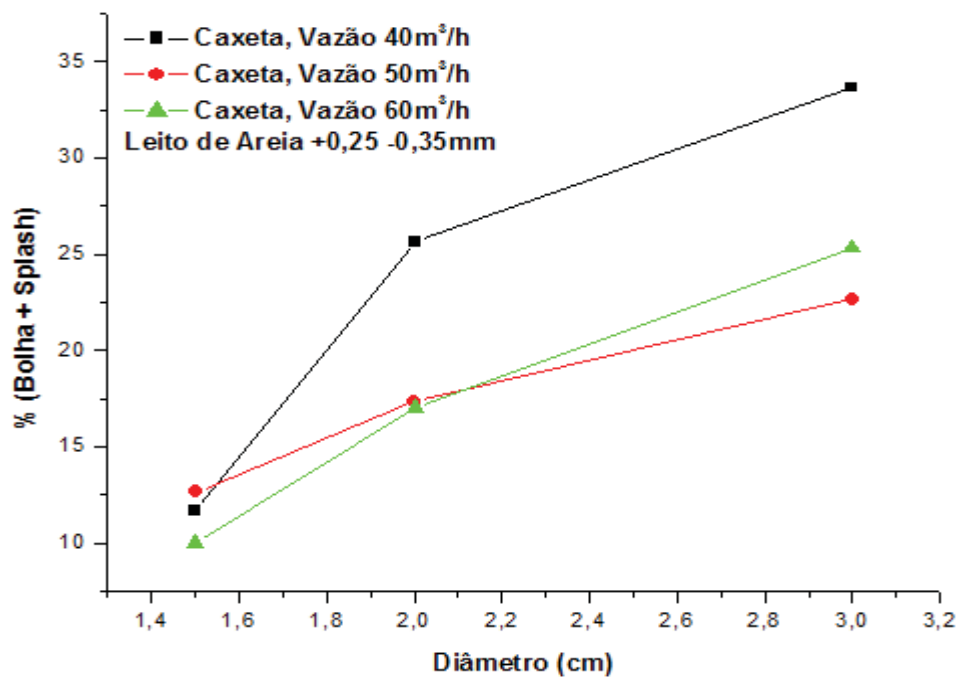


Figura 68: Gráfico do leito de areia com as amostras de Caxeta para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

O leito de areia, por apresentar densidade inferior à da alumina, apresenta porcentagens mais baixas de amostras fora da emulsão do leito, ou seja, oferece maior resistência para as partículas sólidas e estas se concentram mais na emulsão do leito. Porém, em comparação com o tamanho do diâmetro das amostras, o comportamento do leito de areia é semelhante ao leito de alumina; as amostras de caxeta se misturam melhor com o leito na medida em que seu diâmetro diminui e a vazão de ar aumenta no leito.

Em 2.B - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm e amostras de *imbuia* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos:

- Leito fixo de 15 cm contendo areia com granulometria (+0,25 -0,35) mm;
- 10 amostras cilíndricas de madeira (imbuia) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 0,65 g/L;
- Vazão de ar de 40 m³/H, 50 m³/H e 60 m³/H;

Repetimos o processo e apresentamos abaixo, algumas fotos para visualização do novo comportamento do leito a partir da substituição das amostras de caxeta pelas amostras de imbuia.

Areia com amostras de imbuia (Diâmetro: 1,5 cm)



Figura 69: Vazão de 40 m³/H

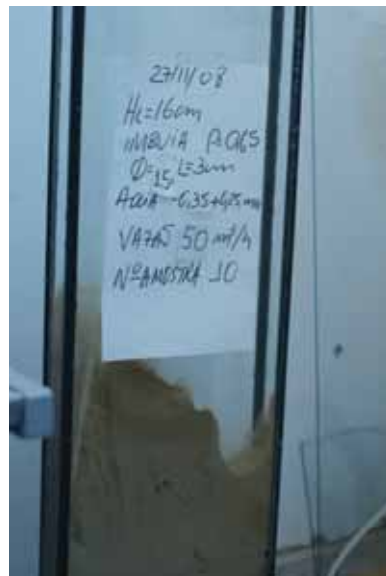


Figura 70: Informações do leito de 50 m³/H

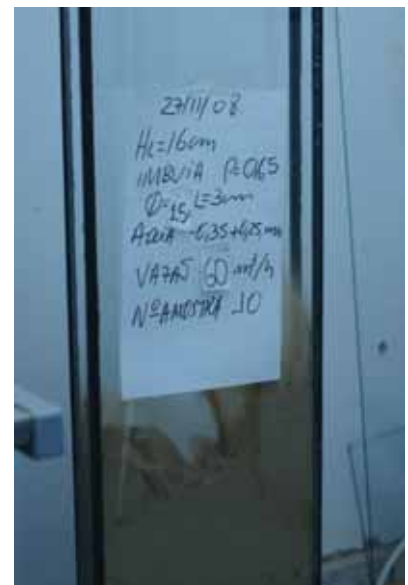


Figura 71: Informações do leito de 60 m³/H

Areia com amostras de imbuia (Diâmetro: 2,0 cm)



Figura 72: Vazão de 40 m³/H

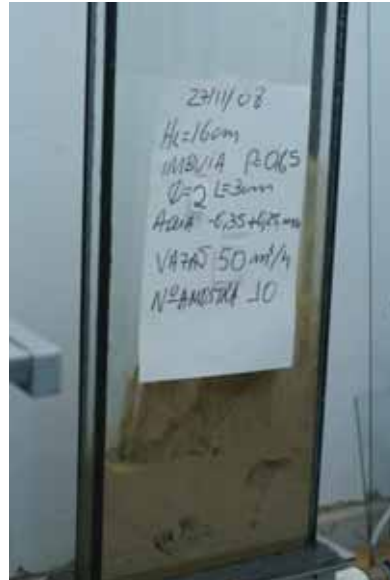


Figura 73: Informações do leito de 50 m³/H



Figura 74: Vazão de 60 m³/H

Areia com amostras de caxeta (Diâmetro: 3,0 cm)



Figura 75: Vazão 40 m³/H



Figura 76: Vazão de 50 m³/H

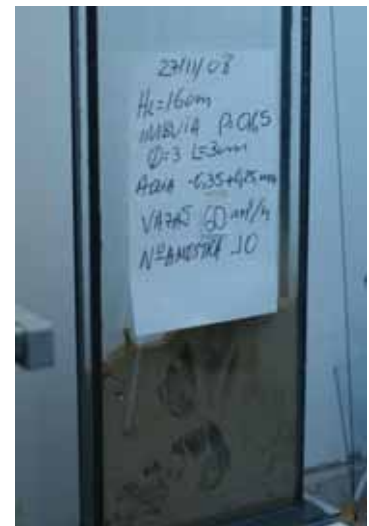


Figura 77: Informações do leito de 60 m³/H

- Representação gráfica:

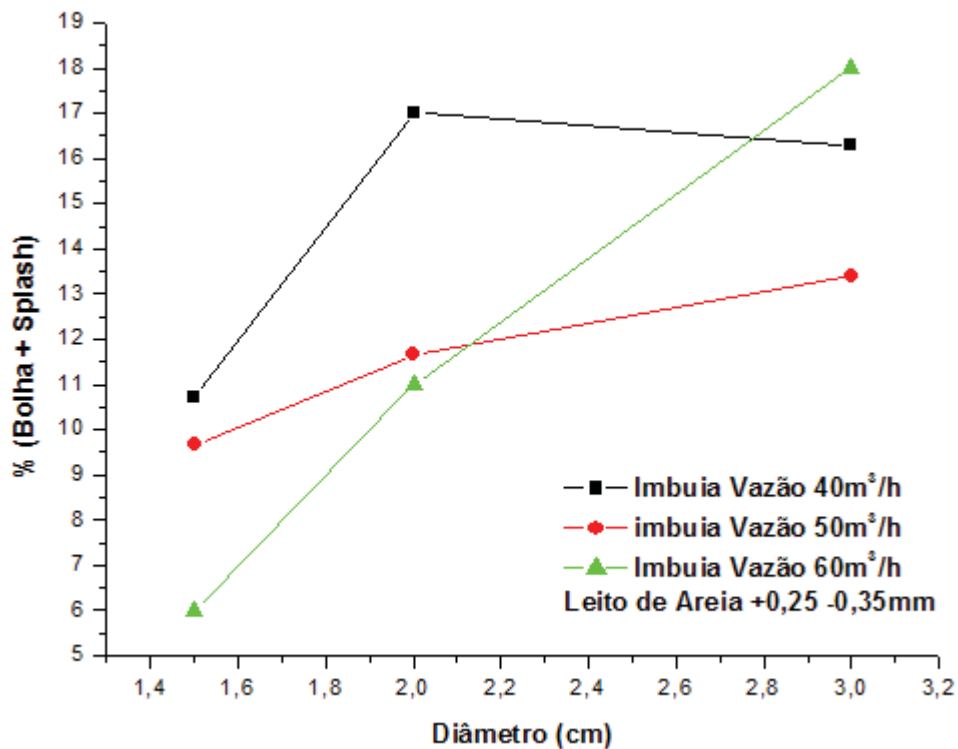


Figura 78: Gráfico do leito de areia com as amostras de Imbuia para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

Pelo gráfico, podemos concluir que ao atingirmos a vazão de 60 m³/H no leito e ao aumentarmos o diâmetro das amostras de imbuia, a porcentagem de amostras fora da emulsão é superior às vazões de 40m³/H e 50 m³/H. Esse comportamento no leito de areia é diferente quanto ao leito de alumina, apresentando uma má mistura para diâmetros de partículas sólidas maiores ao aplicarmos vazões de ar maiores no leito.

Em 3.B - Leito de areia com granulometria (+0,25 -0,35) mm e amostras de *muiracatiara* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos:

- Leito fixo de 15 cm contendo areia com granulometria (+0,25 -0,35) mm;
- 10 amostras cilíndricas de madeira (imbuia) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 1,02 g/L;
- Vazão de ar de 40 m³/H, 50 m³/H e 60 m³/H;

Após a repetição do processo, apresentamos a representação gráfica do comportamento do leito de areia com as amostras de muiracatiara:

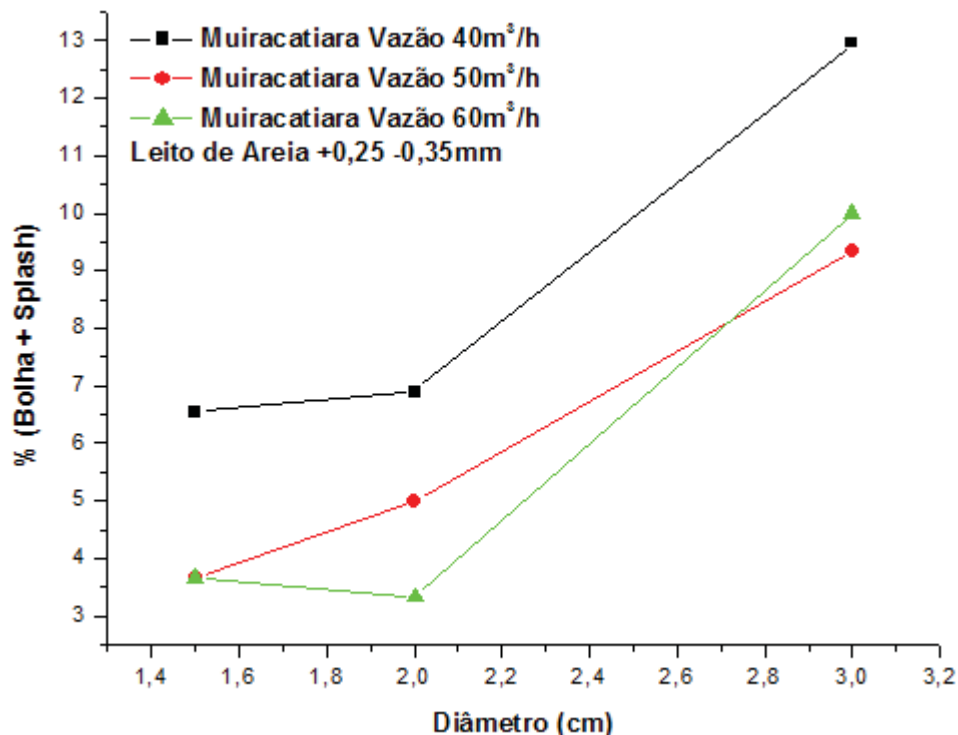


Figura 79: Gráfico do leito de areia com as amostras de Muiracatiara para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

Para as amostras de muiracatiara no leito de areia, seu comportamento também apresenta características diferentes em relação ao leito de alumina. Aqui, quando as amostras possuem diâmetro superior a 2,7 cm e a vazão de gás injetada no leito é de 50m³/H, sua porcentagem fora da emulsão é inferior à vazão de 60m³/H, apresentando uma melhor mistura entre a areia e as amostras desse tipo de madeira.

Em 3. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm e amostras de caxeta com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos a substituição da granulometria do leito de areia:

- Leito fixo de 15 cm contendo areia com granulometria (+0,35 -0,5) mm;

- 10 amostras cilíndricas de madeira (caxeta) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 0,43 g/L;
- Vazão de ar de 40 m³/H, 50 m³/H e 60 m³/H;

Continuamos utilizar o mesmo processo. Apresentando daqui em diante, apenas as representações gráficas e a discussão do comportamento das amostras no novo leito de areia:

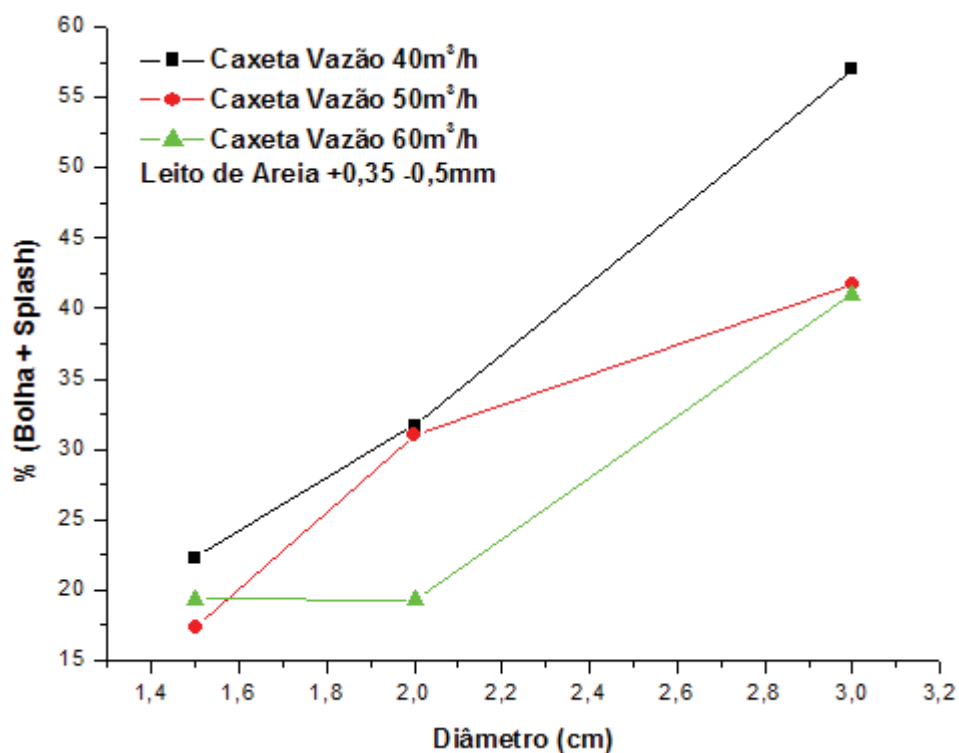


Figura 80: Gráfico do leito de areia com as amostras de Caxeta para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

A substituição da granulometria do leito de areia parece alterar o comportamento do leito, oferecendo metade da resistência que o leito de areia com granulometria anterior (+0,25 -0,35) mm oferecia. Isso pode ser explicado por haver mais espaço entre as partículas de areia do novo leito (+0,35 -0,5) mm. No gráfico, há três situações que divergem do observado para o leito de alumina e o leito de areia anterior. A primeira ocorre para partículas sólidas com menos de 1,6 cm de diâmetro sofrendo ação da vazão de ar de 60m³/H, ela apresenta maior porcentagem de amostras fora da emulsão quando comparado à vazão de 50m³/H.

A segunda situação é vista para partículas sólidas com diâmetro intermediário para as vazões de $40\text{m}^3/\text{H}$ e $50\text{m}^3/\text{H}$, tendo a porcentagem de amostras fora da emulsão muito semelhante para essas vazões. E a última situação ocorre para as partículas com diâmetro superior a 3,0 cm e com a vazão injetada de $50\text{m}^3/\text{H}$ e $60\text{m}^3/\text{H}$; a porcentagem de amostras fora da emulsão é semelhante para essas vazões de ar, porém se aumentarmos o tamanho do diâmetro das partículas para essas vazões, teremos uma melhor mistura do leito para a vazão de $50\text{m}^3/\text{H}$.

Em 3.B - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm e amostras de *imbuia* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos:

- Leito fixo de 15 cm contendo areia com granulometria (+0,35 -0,5) mm;
- 10 amostras cilíndricas de madeira (imbuia) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 0,65 g/L;
- Vazão de ar de $40\text{ m}^3/\text{H}$, $50\text{ m}^3/\text{H}$ e $60\text{ m}^3/\text{H}$;

Observamos nessa situação, que para diferentes tamanhos de diâmetro das amostras de imbuia e diferentes vazões de ar sendo aplicadas no leito, há para cada tamanho de diâmetro, uma vazão de ar que permitirá a menor porcentagem de amostras fora da emulsão no leito. Para as amostras com diâmetro de 1,5 cm, teremos a vazão de $50\text{m}^3/\text{H}$; para as amostras com diâmetro de 2,0 cm, será a vazão de $60\text{m}^3/\text{H}$; e para as amostras com diâmetro de 3,0 cm, a vazão de ar de $50\text{m}^3/\text{H}$ garantirá a melhor mistura do leito fluidizado, como podemos observar:

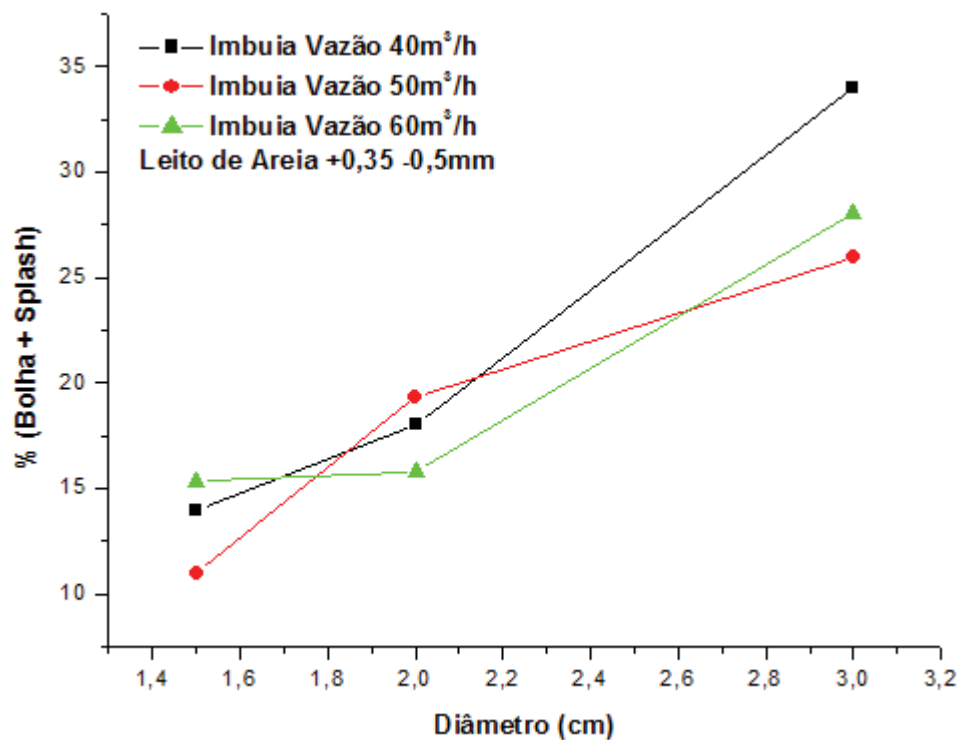


Figura 81: Gráfico do leito de areia com as amostras de Imbuia para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

Em 3.C - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm e amostras de *muiracatiara* com diâmetro de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm; temos:

- Leito fixo de 15 cm contendo areia com granulometria (+0,35 -0,5) mm;
- 10 amostras cilíndricas de madeira (imbuia) com os diâmetros de 1,5 cm, 2,0 cm e 3,0 cm e densidade de 1,02 g/L;
- Vazão de ar de 40 m³/H, 50 m³/H e 60 m³/H;

Para as amostras de *muiracatiara* no leito de areia com maior granulometria, obtivemos:

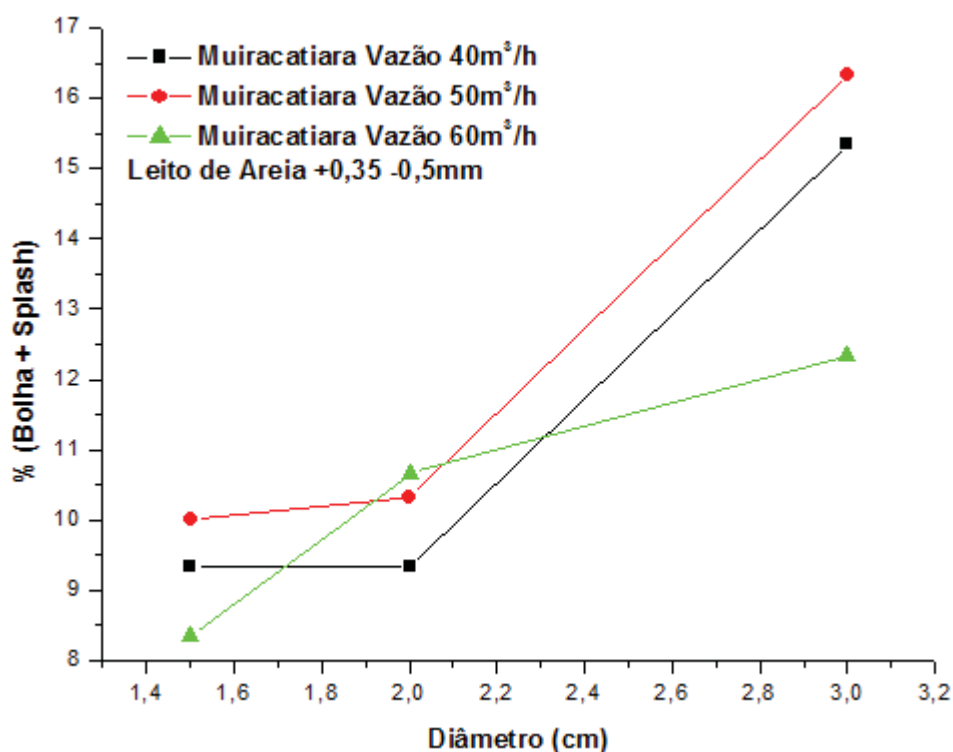


Figura 82: Gráfico do leito de areia com as amostras de Muiracatiara para os diâmetros de 1,5 cm; 2,0 cm e 3,0 cm.

Nessa condição do leito, as amostras de muiracatiara com diâmetro de 2,0 cm e vazão inferior à 60m³/H, apresentam porcentagem de amostras fora da emulsão inferior à de quando aplicamos a vazão de ar de 60m³/H; indicando que existe, para as vazões de ar de 40m³/H e 50m³/H, um intervalo para cada uma, em que o diâmetro das amostras apresentará melhor mistura do que na aplicação da vazão de ar de 60m³/H no leito.

Em relação aos três leitos utilizados, observamos que em todos os casos ao aumentar o diâmetro das amostras, a porcentagem de amostras fora da emulsão é maior.

4.4 Análise III: Amostras fora da emulsão (%) VS. Densidade das amostras

Nessa seção, apresenta-se o comportamento do leito fluidizado de alumina e areia para as amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara, considerando a variação da densidade das amostras. Não houve procedimento experimental nessa seção e na próxima; as análises gráficas (a partir das fotos do método fotográfico) da seção anterior foram responsáveis por fornecer o conteúdo utilizado para a discussão desse tópico e do próximo (4.5 Análise IV: Amostras fora da emulsão (%) VS. Vazão de ar no leito). Sendo assim, não serão apresentadas fotos daqui em diante, somente as representações gráficas para as discussões do comportamento do leito. Para essa seção, teremos as seguintes análises:

1. A - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (1,5 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);
 B - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (2,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);
 C - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (3,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);
2. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com diâmetro das amostras fixo (1,5 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);
 B - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com diâmetro das amostras fixo (2,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);
 C - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com diâmetro das amostras fixo (3,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);
3. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (1,5 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);
 B - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (2,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);

C - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (3,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara);

Em 1. A - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (1,5 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara), considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 1,5 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

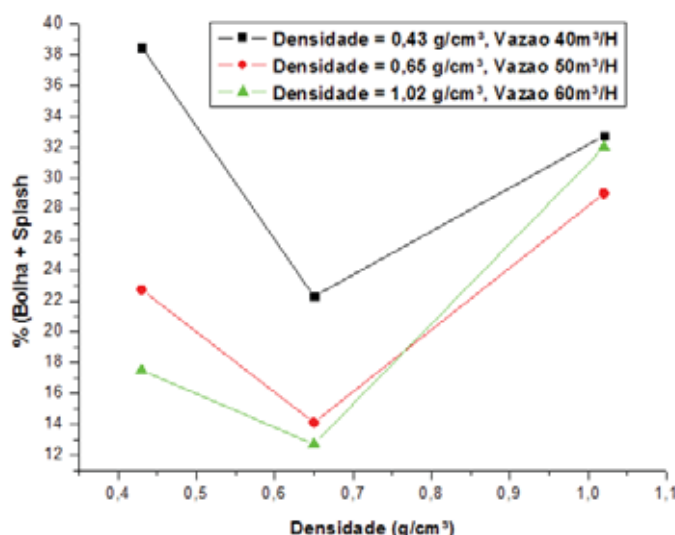


Figura 83: Gráfico do leito de alumina com análise da densidade das amostras (Diâmetro das amostras: 1,5 cm)

Em 1. B - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (2,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara); considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 2,0 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

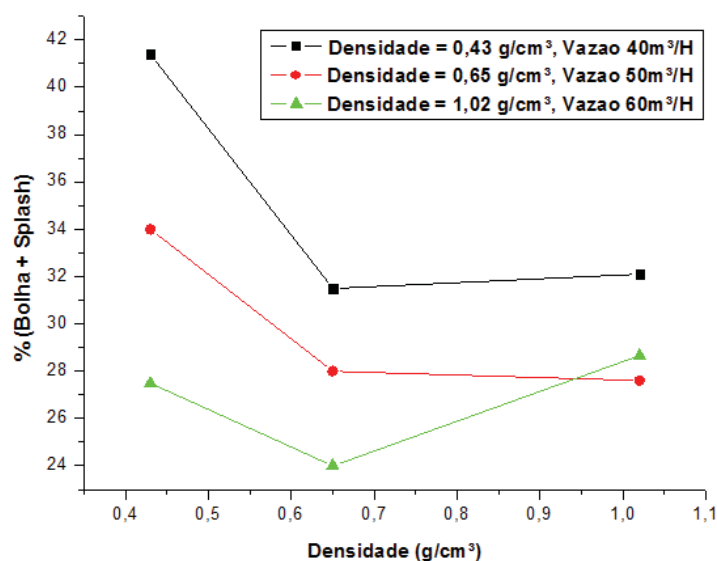


Figura 84: Gráfico do leito de alumina com análise da densidade das amostras (Diâmetro das amostras: 2,0 cm)

Em 1. C - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (3,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara); considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 2,0 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

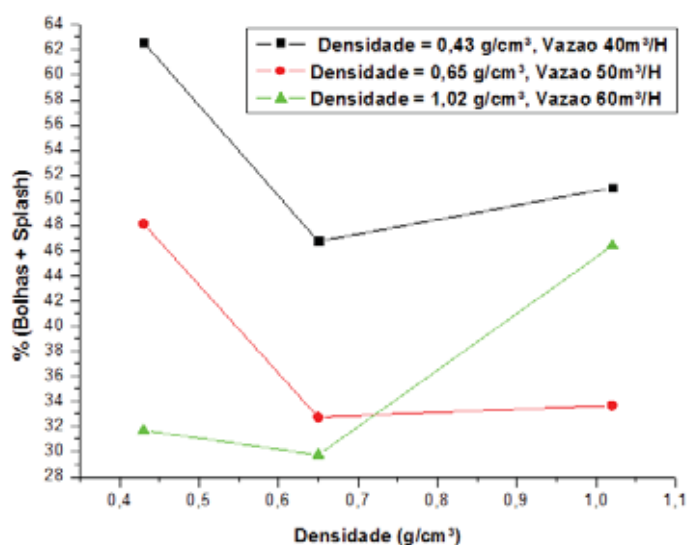


Figura 85: Gráfico do leito de alumina com análise da densidade das amostras
(Diâmetro das amostras: 3,0 cm)

Em 2. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com diâmetro das amostras fixo (1,5 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara); considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 1,5 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

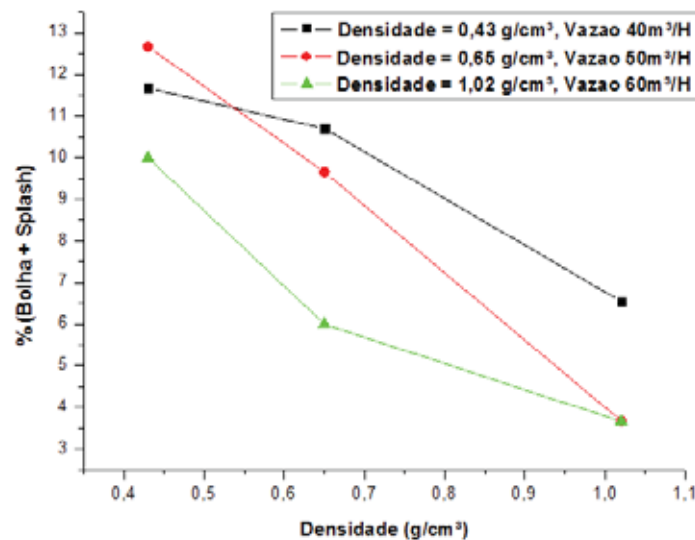


Figura 86: Gráfico do leito de areia com análise da densidade das amostras
(Diâmetro das amostras: 1,5 cm)

Em 2. B - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com diâmetro das amostras fixo (2,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara); considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 2,0 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

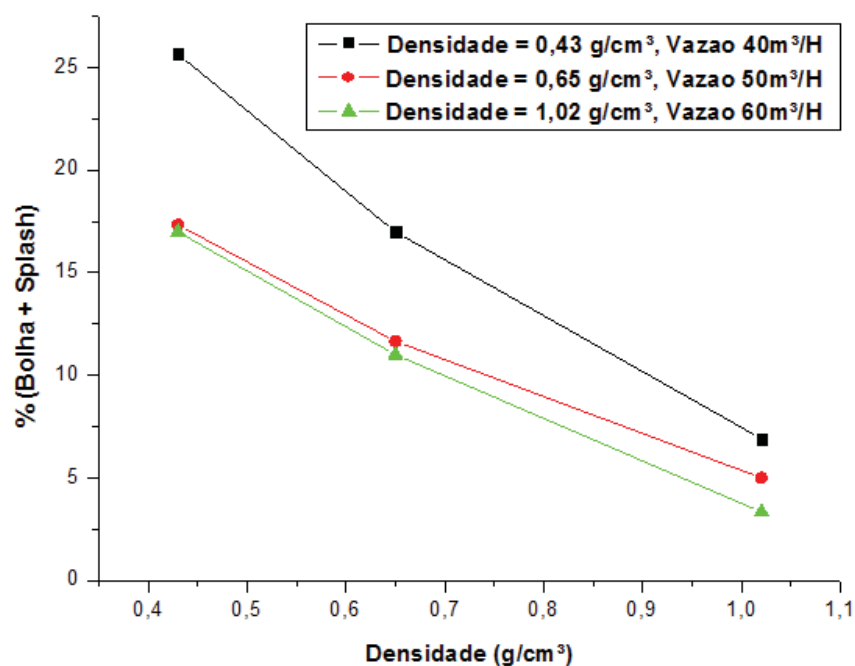


Figura 87: Gráfico do leito de areia com análise da densidade das amostras
(Diâmetro das amostras: 2,0 cm)

Em 2. C - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com diâmetro das amostras fixo (3,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara); considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 3,0 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

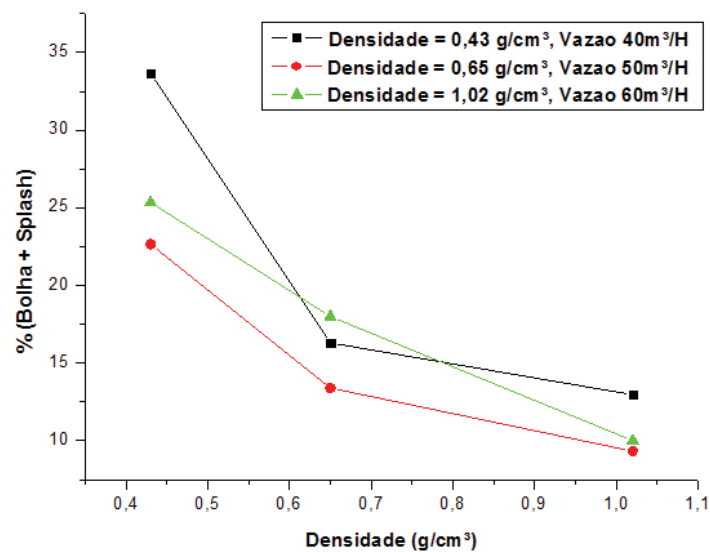


Figura 88: Gráfico do leito de areia com análise da densidade das amostras
(Diâmetro das amostras: 3,0 cm)

Em 3. A - Leito de areia com granulometria (+0,35 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (1,5 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara); considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 1,5 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

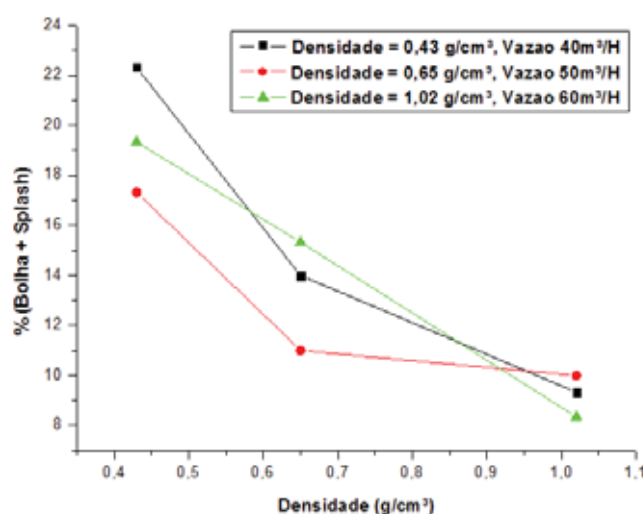


Figura 89: Gráfico do leito de areia com análise da densidade das amostras
(Diâmetro das amostras: 3,0 cm)

Em 3. B - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (2,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara); considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 2,0 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

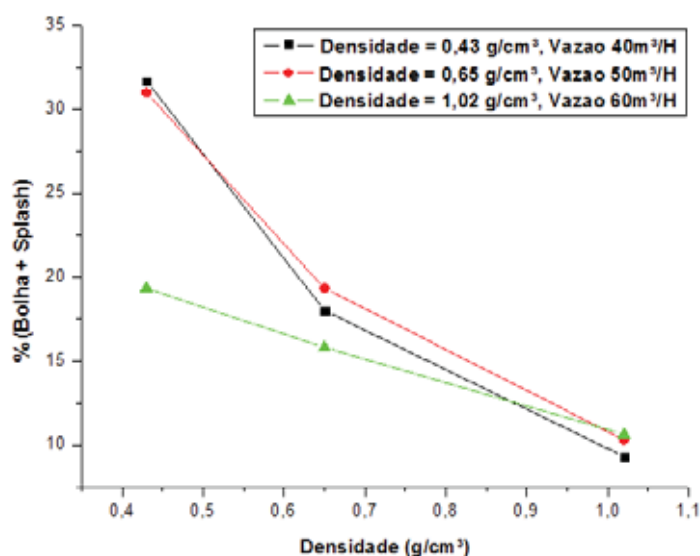


Figura 90: Gráfico do leito de areia com análise da densidade das amostras (Diâmetro das amostras: 2,0 cm)

Em 3. C - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com diâmetro das amostras fixo (3,0 cm) e densidades de 0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara); considera-se para essa condição, o diâmetro das amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara de 3,0 cm e analisa-se o comportamento do leito através da representação gráfica da % de amostras fora da emulsão em relação à densidade das amostras (0,43 g/cm³ (caxeta), 0,65 g/cm³ (imbuia) e 1,02 g/cm³ (muiracatiara)):

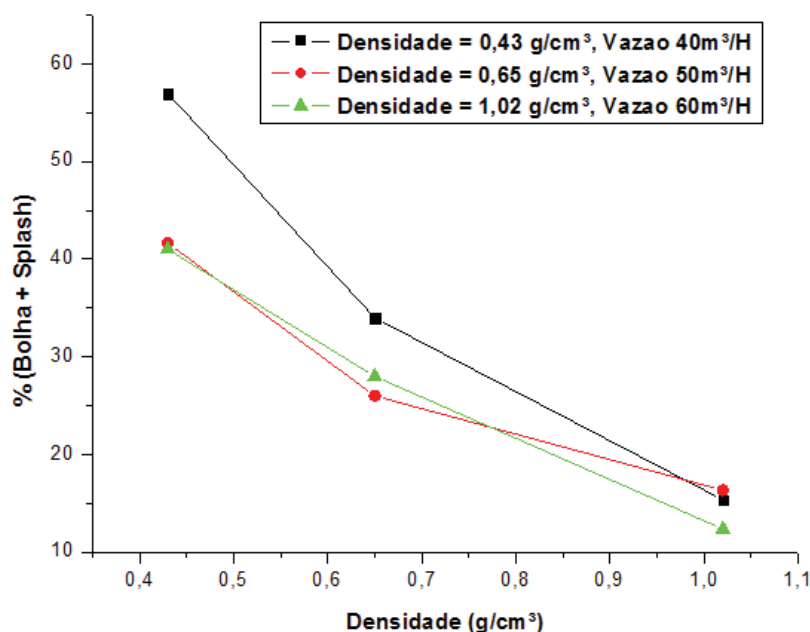


Figura 91: Gráfico do leito de areia com análise da densidade das amostras
(Diâmetro das amostras: 3,0 cm)

A partir dos gráficos apresentados acima, quando ocorre a variação na densidade das amostras, a tendência do leito é promover melhor mistura para maiores densidades e maiores vazões de ar aplicadas no leito, independente do material utilizado no leito.

4.5 Análise IV: Amostras fora da emulsão (%) VS. Vazão de ar no leito

Nessa seção, verificaremos o comportamento do leito fluidizado de alumina e areia para as amostras de caxeta, imbuia e muiracatira, considerando a variação da vazão de ar no leito. Como comentado anteriormente, não houve procedimento experimental nessa seção; as análises gráficas (a partir das fotos do método fotográfico) da seção “4.3 Análise II: Amostras fora da emulsão (%) VS. Diâmetro das amostras” foram responsáveis por fornecer o conteúdo utilizado para a discussão deste. Sendo assim, teremos somente as representações gráficas para as discussões do comportamento do leito. Para essa seção, teremos as seguintes análises:

1. A - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *caxeta* ($\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/H, 50m³/H e 60m³/H);

- B - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *imbuia* ($\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H);
- C - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *muiracatiara* ($\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H);
2. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com a densidade fixa para as amostras de *caxeta* ($\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H);
- B - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com a densidade fixa para as amostras de *imbuia* ($\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H);
- C - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com a densidade fixa para as amostras de *muiracatiara* ($\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H);
3. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *caxeta* ($\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H);
- B - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *imbuia* ($\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H);
- C - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *muiracatiara* ($\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H);

Em 1. A Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *caxeta* ($\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de *caxeta* como sendo ofator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

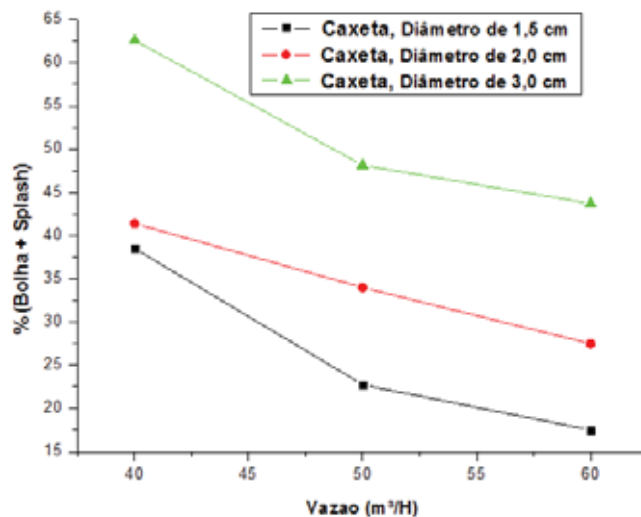


Figura 92: Gráfico do leito de alumina com análise da vazão de ar no leito
(Densidade das amostras de caxeta, $\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$)

Em 1. B - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *imbuia* ($\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de imbuia como sendo o fator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

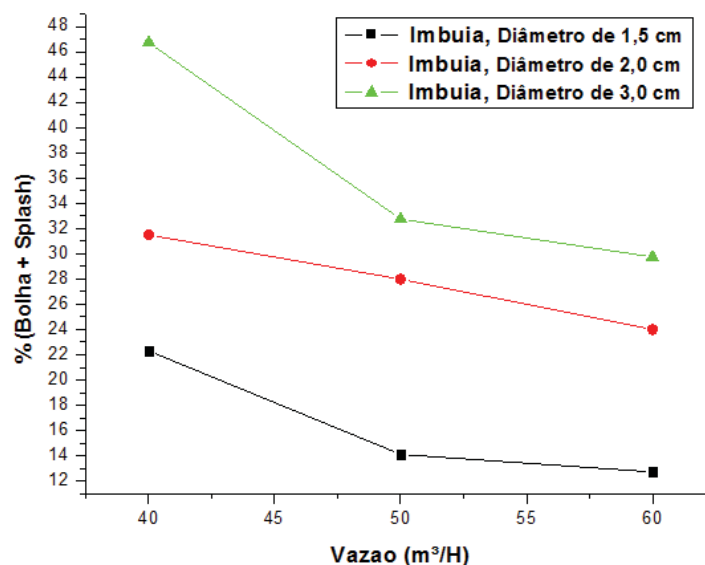


Figura 93: Gráfico do leito de alumina com análise da vazão de ar no leito
(Densidade das amostras de imbuia, $\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$)

Em 1. C - Leito de *alumina* com granulometria (+0,25 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *muiracatiara* ($\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de *muiracatiara* como sendo o fator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

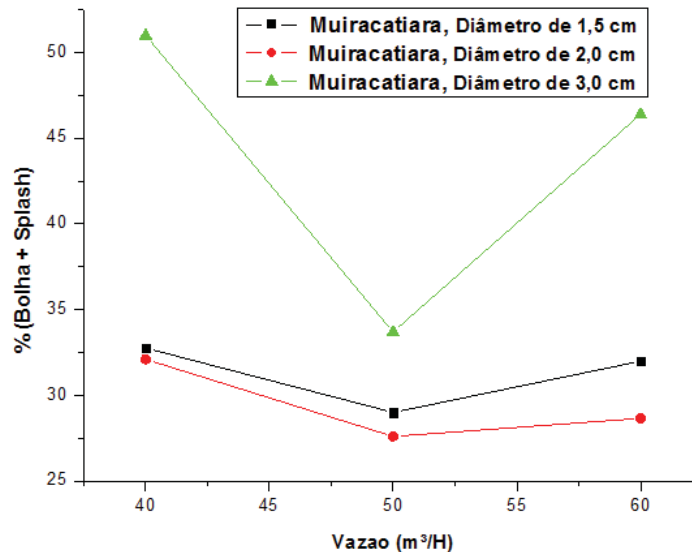


Figura 94: Gráfico do leito de alumina com análise da vazão de ar no leito
(Densidade das amostras de *muiracatiara*, $\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$)

Em 2. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com a densidade fixa para as amostras de *caxeta* ($\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de *caxeta* como sendo o fator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

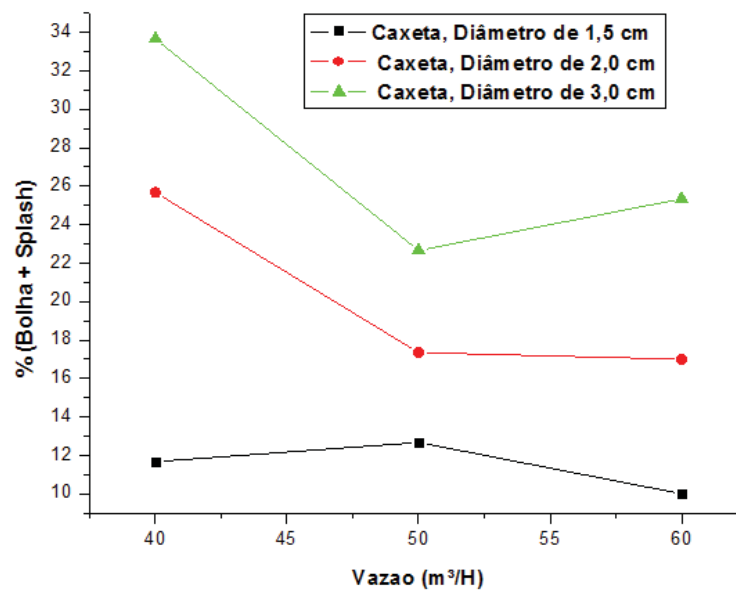


Figura 95: Gráfico do leito de areia com análise da vazão de ar no leito (Densidade das amostras de caxeta, $\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$)

Em 2. B - Leito de areia com granulometria (+0,25 -0,35) mm com a densidade fixa para as amostras de imbuia ($\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de imbuia como sendo o fator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

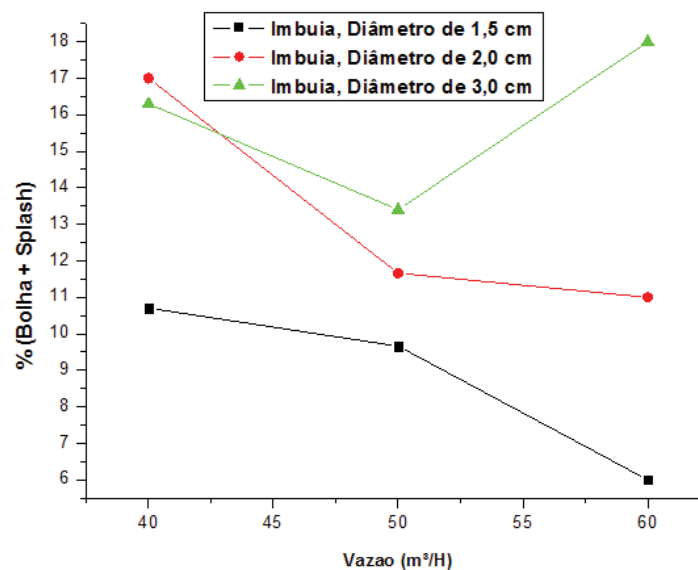


Figura 96: Gráfico do leito de areia com análise da vazão de ar no leito (Densidade das amostras de imbuia, $\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$)

Em 2. C - Leito de *areia* com granulometria (+0,25 -0,35) mm com a densidade fixa para as amostras de *muiracatiara* ($\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de muiracatiara como sendo o fator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

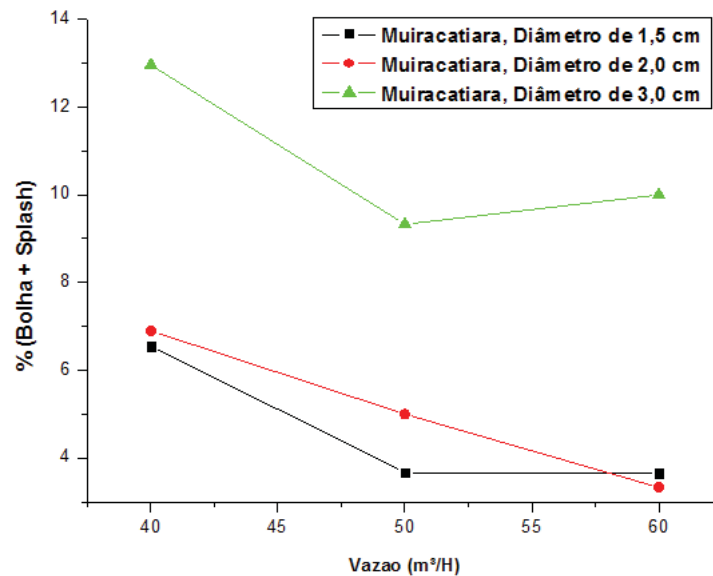


Figura 97: Gráfico do leito de areia com análise da vazão de ar no leito (Densidade das amostras de muiracatiara, $\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$)

Em 3. A - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *caxeta* ($\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de caxeta como sendo o fator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

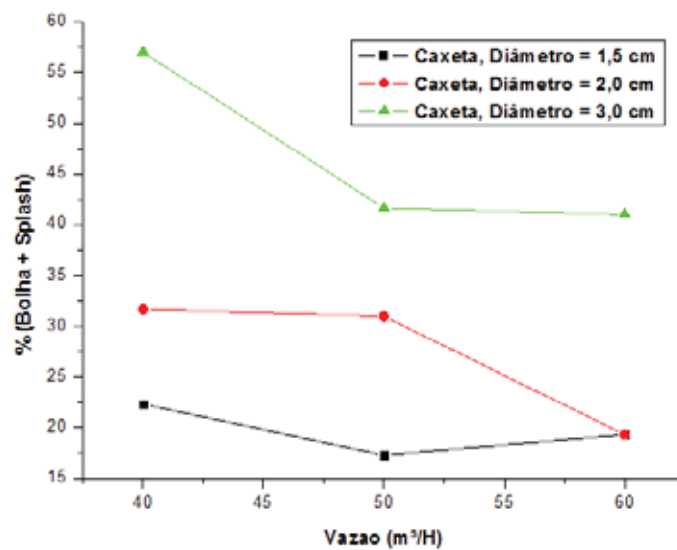


Figura 98: Gráfico do leito de areia com análise da vazão de ar no leito (Densidade das amostras de caxeta, $\rho = 0,43 \text{ g/cm}^3$)

Em 3. B - Leito de areia com granulometria (+0,35 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *imbuia* ($\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de imbuia como sendo o fator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

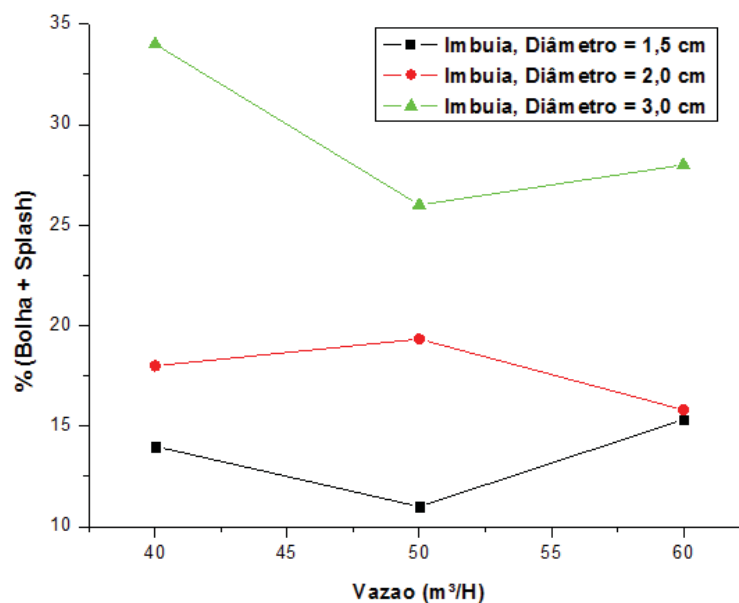


Figura 99: Gráfico do leito de areia com análise da vazão de ar no leito (Densidade das amostras de imbuia, $\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$)

Em 3. C - Leito de *areia* com granulometria (+0,35 -0,5) mm com a densidade fixa para as amostras de *muiracatiara* ($\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$), e variação da vazão de ar inserida no leito (40m³/ H, 50m³/H e 60m³/H); considera-se para essa condição, o a densidade das amostras de *muiracatiara* como sendo o fator fixo, e altera-se o diâmetro das amostras para analisarmos as diferentes vazões de ar aplicadas no leito:

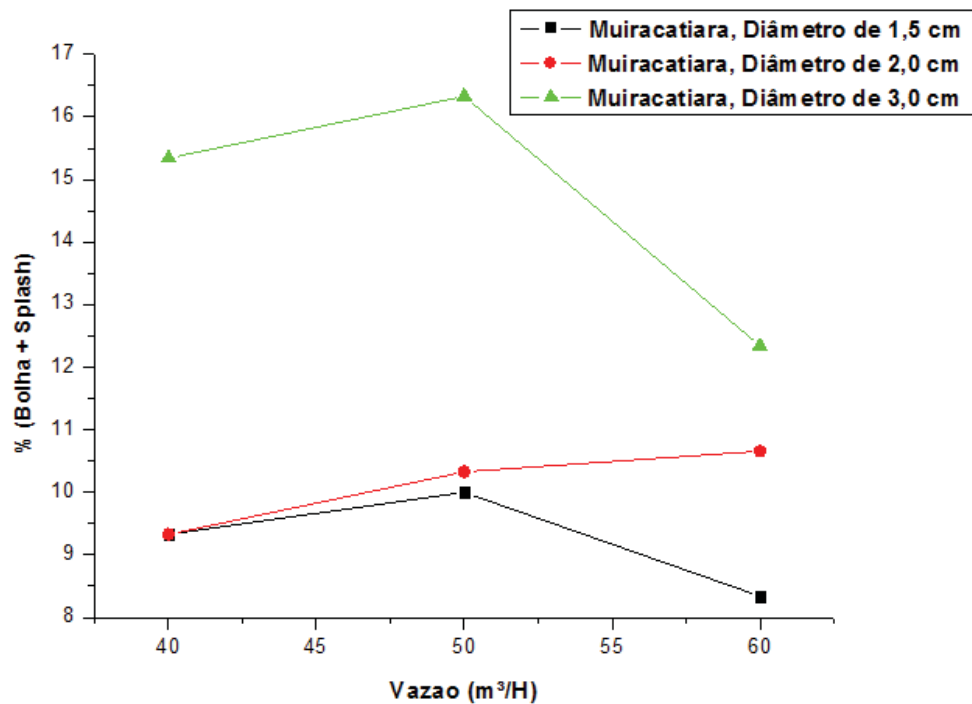


Figura 100: Gráfico do leito de areia com análise da vazão de ar no leito (Densidade das amostras de *muiracatiara*, $\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$)

Com base nessas análises, para a vazão de ar injetada no leito, teremos melhor mistura quando a vazão for maior, em conjunto com as observações referentes ao diâmetro e a densidade das amostras.

5 FORÇAS QUE ATUAM SOBRE AS BIOMASSAS IMERSAS NO LEITO

Neste capítulo, analisaremos a proposta final do trabalho, que se refere às forças exercidas sobre as partículas sólidas (amostras de caxeta, imbuia e muiracatiara) imersas no leito gás – sólido. Para isso, existem três forças que atuam sobre as partículas: força peso, força de arraste e a força de empuxo. A discussão a seguir trata sobre qual ou quais dessas forças influenciam o comportamento do leito e permite uma melhor mistura entre o leito e as partículas sólidas.

5.1 Força Peso

A força peso exercida sobre uma partícula sólida imersa em um reator de leito fluidizado borbulhante (RLFB) não se altera quando aumentamos a velocidade do gás inserido no sistema, através da injeção de vazão de ar. Porém, se aumentarmos a densidade das partículas, a força peso exercida sobre elas irá aumentar, contribuindo para a melhor mistura, pois as partículas tendem a afundar no leito.

5.2 Força de Arraste

No sistema considerado, o fluido do recipiente exerce, sobre a partícula sólida, uma força de arraste com sentido contrário ao da velocidade da partícula. Se a partícula tiver dimensões muito menores em relação ao recipiente e se mover longe de suas paredes, o módulo da força de arraste depende das propriedades do fluido. Segundo a Lei de Stokes, o módulo da força de arraste é dado por:

$$F = 6\pi\eta Rv \quad (22)$$

Onde,

F = Força de arraste

η = Coeficiente de viscosidade do fluido

R = Raio da partícula

v = velocidade do fluido (gás).

Por depender da velocidade, da viscosidade do fluído, sendo esta constante em cada teste, e do tamanho da amostra devido ao seu diâmetro, a força de arraste irá aumentar conforme elevarmos a velocidade do ar inserida no leite. Essa influência no leite, contribuirá para que as amostras se concentrem na região fora da emulsão do leite, o que afetará a mistura.

5.3 Força de Empuxo

A força de empuxo é definida pelo peso do volume de fluído deslocado. Seu sentido é contrário ao da força peso. E assim como a força de arraste, depende da velocidade; quando elevamos a velocidade do ar no leite este se expande, a força de empuxo diminui e isto fará com que as amostras afundem mais facilmente na região de bolhas e na emulsão, promovendo melhor mistura.

6 CONCLUSÕES

Verifica-se através da variação do diâmetro das amostras de biomassa, dentro do leito utilizado (areia ou alumina), que a melhor mistura ocorre para amostras com menor diâmetro e maior vazão de ar.

Em relação à variação de densidade das amostras, a tendência é promover melhor mistura do leito para maiores densidades e maiores vazões de ar aplicadas no leito.

Para a vazão de ar injetada no leito, teremos melhor mistura para maiores vazões coerente com diminuição do empuxo.

Em relação às forças que atuam sobre as partículas sólidas, a força peso deve equilibrar a força de arraste e a força de empuxo para que as amostras de biomassa apresentem melhor mistura. Deve-se citar no entanto, que a forças inerciais e comportamento turbulento do leito, possuem uma influência difícil de ser quantificada. Por isso, o método utilizado (método fotográfico da distribuição de amostras de biomassa no leito), nos dá uma boa indicação do balanço entre as três forças e seu efeito na mistura dentro do leito.

REFERÊNCIAS

Andrade R.V. *, Lora, E.S.L., Melo B. A., Sales C. S. V. B., Gomez, E. O., 2007, 8º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, Cusco, 23 a 25 de Outubro.

Avedesian, M.M., and Davidson, J.F., 1973, "Combustion of Carbon Particles in a Fluidised Bed", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, vol 51, pp 121-131.

Babu, S.P., Shah, B. E Talwalkar, A., Fluidization correlations for coal gasification materials – minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio, AIChE Symposium Series, v.74, p.176-186, 1978.

Bakker, P. J., E Heertjes, M. P., Porosity distributions in a fluidized bed, Chemical Engineering Science, v. 12, p. 260-271, 1960.

Baeyerns, J. and Geldart, D., 1986, "Solids Mixing, chapter 5 of Gas Fluidization Technology, Edited by D. Geldart, John Wiley & Sons, Great Britain, 468 p., 1986.

Cranfield, R.R., and Geldart, D., 1974, "Large particles Fluidization", Chemical Engineering Science, 29, p935-945.

Cui, H. and Grace, J. R., 2007, "Fluidization of Biomass Particles: A review of Experimental Multiphase Flow Aspects", Chemical Engineering Science, 62, p 45-55.

Geldart, D. 1972, "Powder Technology", 7, 285.

Geldart, D. 1986, "Gas Fluidization Technology, Edited by D. Geldart, John Wiley & Sons, Great Britain, 468 p., 1986.

Gauthier, D., Zerguerras, S. and Flamant, G., 1999, "Influence of the Particle Size Distribution of Powders on the Velocities of Minimum and Complete Fluidization, Chemical Engineering Journal, 74, p 181-196.

Jackson, T. B. Anderson Androy. A fluid mechanical description of fluidized beds. Scotland, V. 6 N.4, Novembro 1967.

Kulasekaran, S., Linjewile, T.M., Agarwal, P.K., Mathematical modeling of fluidized bed combustion. 3 – Simultaneous combustion of char and combustible gases, Fuel, v. 78, p.403-417, 1999.

Kunii, D., and Levenspiel, O., 1991, "Fluidization Engineering", John Wiley and Sons, New York, 534p.

Leva M., Flow through packings and beds – correlations in fluidized systems, Chemical Engineering Science, v.64, p. 266-270, 1957.

Lewis, W. K., Gilliland, E. R., Buer W. C., Characteristics of fluidized particles, Industrial Engineering Chemical., v. 41, p. 1104-1112-1231, 1951.

Lewis, J.B., and Partridge, B.A., 1967, "Fluidization", Nature, vol 16,p 121-127.

Marzocchella, A.and Salatino, P., 2000,"Transient Fluidization and Segregation of Binary Mixtures of Particles", AIChE Journal,vol.46, No.11, p.2175-2182.

Nascimento, F. R., Gomes A. P. S., Almeida M. M. e Silva, G. F., "Fluidodinâmica de uma Mistura de Partículas em Leito Fluidizado", Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.3, n.1, p.7-12, 2001

Peçanha, R.P., e Massarani, G., 1986, "Dimensão Característica e a Forma da s Partículas"; Anais do XIV Encontro Nacional de Meios Porosos - ENEMP - Campinas SP; p302-312.

Rao, T.R., and Bheemarasetti, J.V.R., 2001,"Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Snd", Energy, 26, p633-644.

Richardson, J. F. E Zaki N. W., Sedimentation and fluidization: Part I, Trans. Inst. Chem. Eng., v. 32, p. 35-43, 1954.

Saleh, K., Cami, X.B., Thomas, A., Guigon, P., 2006, "An Experimental Study on the Fluidisation Behaviour of Geldart C Glass Powders",KONA, nº24,134-145.

Santos,F.J. and Goldstein Jr,L.,2008, "Experimental aspects of biomass fuels in a bubbling fluidized bed combustor" Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Volume 47, Issues 9-10, September 2008, Pages 1541-1549

Scala, R., Chirone, P., Salatino, P., 2006, "Combustion and attrition of biomass chars in a fluidized bed, *Energy Fuels* 20 (2006) 91–102.

Shen, C.Y., Johnstone F. H., Gas solid contact in fluidized beds, *AIChE Journal*, v. 1, p. 349-360, 1955.

Sriramulu, S., Sane, S., Agarwal, P., MathewsATHEWS, T., Mathematical modelling of fluidized bed combustion. 1 – Combustion of carbon in bubbling beds", *Fuel*, v.75, p.1351-1362, 1996.

Srinivasan, R.A., Sriramulu, S., Kulasekaran, S., Agarwal, P.K., Mathematical modelling of fluidized bed combustion. 2 – Combustion of gases, *Fuel*, v. 77, p. 1033-1049, 1998.

Santos, Francisco José. Fluidodinâmica do leito fluidizado, aplicada à gaseificação. In: Sánchez, Caio Clauco (Org.). *Tecnologia da Gaseificação de Biomassa*. São Paulo: Átomo, 2010. P. 269 – 282.

Rodrigues, Varlei et al . Experimento 10 VISCOSIDADE: LEI DE STOKES. Disponível em: <<http://www.ifi.unicamp.br/leb/f229ELZA08/Exp10-Viscosidade-Lei%20de%20Stokes-R1.pdf>> Acesso em: 20 Outubro 2012.